Untersuchungen über den Einfluß der Pflanzenwurzeln auf die Struktur des Bodens

Von der Kgl. Technischen Hochschule zu München

zur Erlangung der Würde eines

Doktors der technischen Wissenschaften

genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Diplomlandwirt Max Berkmann

München

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

Referent: Geheimer Hofrat Prof. Dr. Carl Kraus

Korreferent: Geheimer Rat Prof. Dr. Franz Ritter von Soxhlet

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Februar 1913

Tag der Annahme der Dissertation: 27. Januar 1913.

Melle i. H. 1913

Buch- und Kunstdruckerei F. E. Haag

Es sei mir gestattet, auch an dieser Stelle meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Geh. Hofrat Prof. Dr. C. Kraus, für die Anregung und Förderung der Arbeit, Herrn Assistent J. Weigert für seine Bemühungen herzlichst zu danken.

Inhalt.

Seite

Einleitung 7

Die Gewinnung des Bodenmaterials für die Untersuchungen und über die Versuchskulturen 9

I. Die Eigenbewegungen des Bodens („Selbstlockerung") 13

II. Wurzelwirkung im lockeren und dichten Boden in Krümelstruktur 20

III. Wurzelwirkung im dichten Boden mit Einzelkornstruktur . . 26

IV. Lockerungsvorgänge im Zusammenwirken von Wurzeltätigkeit und Selbstlockerung 33

Zusammenfassung der Ergebnisse 44

V. Das Eindringen von Wasser in den Boden unter dem Einflusse der Vegetation 45

Tabellen 52

Dem Andenken meines Vaters

in Dankbarkeit

gewidmet

Einleitung.

Die Bewurzelungsverhältnisse der Kulturpflanzen haben in neuerer Zeit vielfache Bearbeitung gefunden, entsprechend der großen Bedeutung, welche die nähere Kenntnis davon für die Pflanzenproduktion hat. Diese Untersuchungen erstreckten sich hauptsächlich auf die Morphologie der Wurzelsysteme, die Verbreitung in verschiedenen Erdschichten, die Abänderungen im Wurzelverlauf in Akkommodation an die mechanischen Bodenzustände usw.; nur spärlich und mehr nebenher und gelegentlich wurde dagegen die Frage berücksichtigt, in welcher Weise die Wurzel selbst als wachsendes und dadurch nach außen hin mechanisch wirkendes Organ die Umgebung aktiv zu beeinflussen, die Struktur des Bodens und damit dessen physikalische Eigenschaften zu verändern imstande ist, und von welchen Folgen die durch die Aktion der Wurzel hervorgerufenen Veränderungen des Bodens für die Vegetationsbedingungen begleitet sind.

Die Untersuchungen über die Änderungen in der Bodenstruktur unter dem mechanischen Einfluß der Bewurzelung ließen ohne weiteres erkennen, daß damit auch einschneidende Veränderungen im Verhalten zu Wasser und Luft verbunden sein müssen. Es handelt sich dabei aber nicht nur um die Änderungen in der Lagerungsweise des Bodens selbst unter der Aktion der Wurzeln, sondern auch um die direkten und indirekten Folgen, welche die mehr oder weniger reichliche Verbreitung der Wurzeln selbst, mit verschiedener horizontaler und vertikaler Verteilung in der Erde, ihre verschiedene Dimensionierung nach Länge, Dicke, Verzweigungsweise und die Abänderungen hierin unter dem Einflusse der Bodenbeschaffenheit, Stärke des Wachstums der Pflanzen und damit ihrer Bewurzelung usw. mit sich bringt. Es ist für die Ausgestaltung der Bodenphysik in Richtung der Aufklärung der Verhältnisse in der freien Natur und in der Praxis der Pflanzenkultur gewiß uner-

läßlich, daß gerade das in Rede stehende Gebiet die gebührende Berücksichtigung findet.

Da systematische Vorarbeiten gänzlich fehlen, so boten sich dem ersten Eindringen in das an und für sich recht komplizierte Gebiet große Schwierigkeiten dar. Eine abschließende Bearbeitung konnte vorweg nicht in Aussicht genommen werden, wie sich versteht, wenn man an die endlose Mannigfaltigkeit der Bodenverhältnisse und Bodenzustände und deren Beeinflussungen durch natürliche und kulturelle Einwirkungen einerseits, an die Verschiedenartigkeiten der Wurzelsysteme der vielen kulturell interessierenden Pflanzen und an die zahllosen Komplikationen andererseits denkt, in welchen die genannten und andere Faktoren bei der Frage ins Spiel kommen.

Es möge davon abgesehen sein, an dieser Stelle alle die in der Literatur weit zerstreuten Einzelangaben aufzuführen, die unser Thema berühren, das mit den vorliegenden Untersuchungen in nächster Beziehung stehende Literaturmaterial ist im Text mitgeteilt.

Hier seien nur einige Autoren erwähnt, aus deren Mitteilungen besondere Anregungen für die vorliegenden Untersuchungen entsprungen sind. Es sind dies Schumacher, Pfeffer und Ramann. Schumacher verdanken wir namentlich Angaben über die Vorgänge der Selbstlockerung der Böden; die experimentellen Untersuchungen von Pfeffer schufen die wertvollste Grundlage für das Verständnis der mechanischen Wurzeltätigkeit; Ramann betonte die große Bedeutung und Notwendigkeit eingehender Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Pflanzenwelt und Boden, und seine Beobachtungen über die Verbesserung mancher Böden hinsichtlich ihrer Struktur unter dem Einflusse der Wurzeln sind für uns besonders bemerkenswert.

Zuletzt hat sich mit einschlägigen Fragen C. Kraus beschäftigt, und dessen Untersuchungen über die Wurzelverbreitung und Struktur des Bodens in ausdauernden Grasflächen bildeten den nächsten Ausgang für die vorliegende Arbeit.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen mußte natürlich zunächst auf die Erforschung der Art und Weise gelegt werden, in welcher die Aktion der Wurzeln den Boden unmittelbar verändert; erst auf Grund dieser Erkenntnis ist es möglich, an exakte Untersuchungen über das Maß der Veränderungen heranzutreten, welche

die Bewurzelung direkt und indirekt für das physikalische Verhalten des bewachsenen Bodens im Vergleich mit unbebautem hervorruft. Verfasser hat auch nicht unterlassen, das vorwürfige Gebiet über die der Bearbeitung zunächst gesetzten Ziele hinaus in Angriff zu nehmen, es wurden vielmehr sehr eingehende Untersuchungen bodenphysikalischer Art angestellt. Dabei zeigte sich bald, daß die von verschiedenen Autoren in Vorschlag gebrachten Methoden für die Untersuchungszwecke, welche verlangten, daß von den natürlichen, unveränderten Bodenzuständen ausgegangen wird, unzureichend sind, daß ferner der derzeitige Stand der bodenphysikalischen Kenntnisse noch in wichtigen Punkten im Stiche läßt. An dieser Stelle soll auf alle diese, bei ihrem großen Umfang nur zum kleinen Teil erledigten Fragen nicht näher eingegangen werden, ausgenommen die Beobachtungen über den Einfluß der Wurzeln auf das Eindringen des Wassers in die Erde, da dies in nächster Beziehung zu den Freilandsbeobachtungen über die Wirkungen der Wurzeln in den oberflächlichen Erdschichten steht.

Die Gewinnung des Bodenmaterials für die Untersuchungen und über die Versuchskulturen.

Schon im Frühjahr 1911 war eine Reihe von Topfkulturen mit verschiedenem Bodenmaterial in lockerer und dichter Lagerung, mit verschiedenen Pflanzen und ohne solche angelegt worden. Diese Versuchsreihe wurde über Winter im Keller aufbewahrt, so daß im nächsten Jahre zweijährige Kulturen zur Verfügung standen, denen im zweiten Vegetationsjahre eine entsprechende einjährige Reihe gegenübergestellt wurde.

Es kamen 34 sog. Lysimetergefäße in Verwendung, 40 cm hohe Blechkästen vom Querschnitt 20 × 20 cm, die im Innern in Höhe von 10 cm vom Boden eine Siebeinlage trugen, nebst einer darunter befindlichen Vorrichtung zum Wasserablauf. Diese wurden mit zwei verschiedenen Bodenmaterialien gefüllt, und zwar mit geworfener Versuchsfelderde, ein schwachlehmiger, humushaltiger Sandboden, und einem Lehmboden aus der Gegend von Lochhausen. Von den 24 Gefäßen, die zunächst beschickt werden sollten, wurden je 6 in gewöhnlicher Weise locker mit jeder Bodenart versehen, je 6 aber mit dem jeweiligen Material in dichter

Lagerung gefüllt. Diese Verdichtung wurde durch ein sehr mühsames Einstampfen in Schichten von 2—3 cm erzielt, wobei jedoch ein bestimmter Feuchtigkeitsgrad des Materials unbedingtes Erfordernis bildete, unterhalb dessen eine Zerstörung der groben Krümel, insbesondere beim Versuchsfeldboden, nicht möglich war. In die noch übrigen 10 Lysimeter wurde nur Versuchsfelderde eingestampft. Zu den 24 in geschilderter Weise gefüllten Lysimetern kamen noch 12 große runde Blechgefäße, die gleichfalls eine Siebeinlage über dem Gefäßgrunde zum Ablaufen des Wassers besaßen. Auch davon wurden je 6 mit Versuchsfelderde locker und dicht gefüllt. Bei diesen letzteren 6, wie weiter bei 16 großen Kulturtöpfen aus Ton, fand die Verdichtung des betreffenden Bodenmaterials in anderer Weise statt, indem nämlich eine bestimmte Menge davon in Wasser aufgeweicht und zu einem zähen Brei verarbeitet wurde. Auf diese Weise gelang es, beim Versuchsfeldboden eine viel weiter gehende Verdichtung zu erlangen, wie die nachstehenden Porositätsbestimmungen zeigen:

		Porenvolum
Lehm	eingestampft	= 30,71 %
	eingeschlämmt	= 32,41 %
Versuchsfeld-erde	eingestampft	= 37,04 %
	eingeschlämmt	= 30,92 %

Beim Lehmboden kommen sich die Bestimmungen für „eingestampft“ und „eingeschlämmt“ ziemlich gleich; die größere Zahl von eingeschlossenen Luftblasen in dem in Wasser aufgeweichten und beim Austrocknen Risse bildenden Lehm lassen die etwas höhere Porositätszahl von „eingeschlämmt“ erklären.

Die Schwierigkeit einer Vernichtung der Krümelstruktur des Versuchsfeldbodens durch bloßes Stampfen kennzeichnet sich klar in dem immer noch hohen Gehalt an Hohlräumen nach der Verdichtung, wogegen der eingeschlämmte Boden den Lehm in der Verdichtung erreicht. Diese Aufweichung der Materialien ging aber nie so weit, daß der Boden zum Fließen kam, daher der relativ hohe Gehalt an Poren. Die Kohäreszenz der eingeschlämmten Böden war sehr beträchtlich, so daß im trockenen Zustand häufig mit Hammer und Meißel gearbeitet werden mußte, um einen Einblick ins Innere der Bodenmasse zu erhalten.

Zu den mit eingeschlämmtem Boden gefüllten 16 Tontöpfen kamen ferner noch 12 mit dem gleichen Boden in lockerer Lagerung.

Die Lysimetergefäße wurden teils mit Trifolium pratense und Lolium perenne als Vertreter der beiden Hauptbewurzelungstypen (Pfahlwurzler und Büschelwurzler) besät, teils blieben sie unbebaut, so daß von den beiden verwendeten Bodenarten dichte und lockere Füllungen bebaut und unbebaut vorhanden waren. Die anderen Versuche dienten vor allem dazu, ständig Untersuchungsmaterial an der Hand zu haben; sie wurden außer mit Rotklee und englischem Raygras mit Getreide, Ackerbohne und Senf bebaut. Die Einteilung der Kulturen in den ersten 24 Lysimetern war so getroffen, daß nun für jede Bodenart (Lehm und Versuchsfeldboden), für jede Lagerung (locker und dicht), sowie für jedes Gewächs (Lolium und Trifolium) und für die entsprechenden unbepflanzten Böden immer je zwei gleiche Gefäße vorhanden waren. Da diese Versuchsreihe für die späteren Untersuchungszwecke in jeder Richtung vollständig war, wurde sie nach dem ersten Vegetationsjahr im Keller überwintert und erst nach dem zweiten Vegetationsjahr, währenddessen sie eine gleiche Behandlung wie die übrigen einjährigen Kulturen erfuhr, aufgearbeitet. Eine mehrmalige Ernte der oberirdischen Produktion stellte die auffallenden Unterschiede der Entwicklung im dichten und lockeren Boden während der beiden Jahre zahlenmäßig fest. (Siehe Tabelle I.)

Weiterhin wurde eine Anzahl von Blechkästen von 50 cm Tiefe und einem Querschnitt 25 × 25 cm, mit einer abnehmbaren Seitenwand, in der gleichen Weise, wie oben geschildert, teils mit eingestampftem und teils mit eingeschlämmtem Lehm- bzw. Versuchsfeldboden gefüllt und großenteils mit Vicia faba angebaut; sie dienten zu eingehenden Studien des Wurzelverlaufes und der hieraus entstehenden Veränderungen des mechanischen Zustandes des Bodens. Eine Reihe gleicher Gefäße in lockerer Einfüllung aus früheren Jahren mit verschiedenen Gräsern, Luzerne usw. waren aus den Beständen des Versuchsfeldes zu ergänzenden Beobachtungen überlassen.

Die erwähnten Kulturen wurden zum Teil in der Vegetationshalle des Versuchsfeldes aufgestellt, wo sie, auf Rollwagen stehend, den Einwirkungen der Niederschläge durch Einfahren in einen gedeckten Raum entzogen werden konnten — zum Teil wurden sie im Freien eingegraben. Bei der Ansaat wurde eine 2—3 cm hohe Schicht lockerer Versuchsfelderde auf die Oberfläche der

dichten Böden aufgebracht, um das Aufkeimen zu erleichtern. Im übrigen erhielten die Kulturen bei fortschreitendem Wachstum eine gleichmäßige Düngung mit Nährstoffsalzen.

Durch systematische Aufarbeitung des verfügbaren Materials, Hand in Hand mit Ausgrabungen im Freilande, wurde allmählich ein Überblick über die weitere Richtung der Versuchsanstellung gewonnen. Mit Beginn des Frühjahrs 1912 wurden die Versuchsreihen des Vorjahres mit perennierenden Pflanzen durch eine ähnliche Reihe mit einjährigen Pflanzen, Pferdebohne und Getreide, wieder als Repräsentanten der beiden Bewurzelungstypen, nebst dem entsprechenden, von Pflanzen unbeeinflußten Bodenmaterial ergänzt und weitergeführt.

Nach Anlage dieser Kulturen richtete sich das Hauptaugenmerk der Untersuchung auf die Zustände im natürlichen Freilandboden, was nun nach Feststellung der einschlägigen Verhältnisse in den von verwirrenden Nebeneinflüssen freigehaltenen künstlichen Kulturen größeren Erfolg versprach. Zu diesem Zweck wurde u. a. aus den Versuchsparzellen des Versuchsfeldes unter den verschiedensten Pflanzenbeständen, auch auf den Fußwegen und unbebauten Reihen zwischen den Anlagen, Bodenproben entnommen und hinsichtlich ihrer Struktur, Kohäreszenz und dgl. untersucht. Ferner wurde eine große Reihe von Untersuchungen mit einem einfachen Apparate zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit und Leitungsfähigkeit unter den verschiedensten Verhältnissen im Freilande angestellt. Zu ähnlichen Zwecken wurden mehrere Exkursionen in das Gebiet der Vorberge unternommen, deren uralte Weideböden eine reiche Ausbeute zur Erkenntnis der in Untersuchung stehenden Verhältnisse verhieß. — In den mit Rein- und Mischsaaten von Gräsern bei verschiedener Nutzung als Wiese bzw. Weide (durch entsprechend häufigen Schnitt) angelegten Parzellen des Versuchsfeldes lieferte ein umfangreicher Versuch wertvolle Ergänzung zu den bis dahin gewonnenen Resultaten. Es wurden nämlich hier zwei lange Gräben bis auf den Kiesuntergrund geführt, quer durch die Parzellen, das eine Mal an der Grenze der als Wiese angelegten Parzellen und eines Weges, das andere Mal an der Grenze von Wiese und Weide. Nach beiden Seiten hin wurden die Strukturverhältnisse usw. genauestens festgelegt und auch große Proben von ca. 15 cdm Mächtigkeit zu weiteren Bestimmungen ausgehoben.

I. Die Eigenbewegungen des Bodens („Selbstlockerung").

Wenn die Pflanzenwurzel in den Boden eindringt, so sind es zunächst rein mechanische Wirkungen, die zur Geltung kommen und die Struktur verändern. Man kann sich vorstellen, daß die Wurzel dabei wie ein keilförmiger Stift in den Boden eingebohrt wird und dort je nach dessen Dichte und Feuchtigkeit verschiedene Wirkungen äußert, die auf eine Umgestaltung des mechanischen Zustandes hinarbeiten — vorausgesetzt, daß in der Pflanze Kräfte vorhanden sind, die auch hohen Widerständen sich gewachsen zeigen. Daß der Pflanze unter Umständen solche Kräfte bis zur beträchtlichen Höhe von 10 Atmosphären zur Verfügung stehen und zur Auslösung bei geeigneter Widerlage kommen können, hat Pfeffer[1]) experimentell nachgewiesen.

Die Betrachtung des von Wurzeln beeinflußten Bodens allein aber vermag noch nicht ein geeignetes Bild von der mechanischen Wurzelwirkung zu liefern. Es stellte sich im Verlaufe der Untersuchungen heraus, daß zur richtigen Scheidung der durch Wurzeln hervorgerufenen Strukturveränderungen von den eigenen Veränderungen des Bodens, sei es durch natürliche Einflüsse von außen, sei es durch selbsttätige Umlagerungen infolge von Spannungs- und Kohäreszenzverschiebungen im Innern, notwendig war, eine genaue Beobachtung des nackten, von Pflanzen nicht beeinflußten Bodens voraus und nebenher gehen zu lassen. Noch ehe Verfasser jenen Zusammenhang der Eigenbewegungen des Bodens mit den Wirkungen der Wurzeln erkannt hatte, fand sich Ende September 1911 bei Eröffnung eines der früher genannten Blechgefäße, das mit eingeschlämmter Versuchsfelderde beschickt und mit Vicia faba seit ca. 6 Monaten bewachsen war, in den oberen 10 cm eine ganz offensichtliche Lockerung und teilweise Zermürbung der Bodenmasse. Auffallend waren horizontale, die ganze Bodenmasse durchziehende Sprünge, längs deren sich plattenartige Stücke und Schollen abhoben, zwischen denen die Wurzeln bündelweise hervorquollen. Dieser erste Befund schien unzweifelhaft die Wirkungsweise der Wurzeln zu demonstrieren, daß nämlich die an sich mehr horizontal verlaufenden Seitenwurzeln von Vicia faba eine solche plattenartige Lamellierung hervorgerufen hätten, eine Erklärung,

[1]) Pfeffer, Druck und Arbeitsleistung der wachsenden Pflanze.

die um so glaubwürdiger dünkte, als die wenig in die Tiefe gedrungenen Pfahlwurzeln eine ausgesprochene Tendenz zeigten, in Richtung einer solchen Spalte besonders viele und kräftige Seitenwurzeln zu entsenden. Die darauffolgende Untersuchung eines nicht mit Pflanzen besetzten, sonst aber in gleicher Weise hergestellten und behandelten Bodens ergab jedoch das gleiche Bild hinsichtlich dieser eigenartigen Struktur, wenn auch mit geringerer Deutlichkeit, und ließ erkennen, daß jener Vorgang der Lamellierung an der Oberfläche dichter Böden einen von den Wurzeln primär unabhängigen Prozeß darstellt und zunächst nur auf einer Kohäreszenzverschiedenheit im Innern der Bodenmasse beruht, hervorgerufen und beschleunigt durch mehr oder minder starke Schwankungen des Feuchtigkeitsgehaltes.

Ähnliche Vorkommnisse scheinen von verschiedenen Forschern hier und dort beobachtet worden zu sein, wie aus manchen Angaben in der Literatur hervorgeht, ohne daß aber nähere Nachforschungen angestellt wurden.

So sagt z. B. E. Wollny[1]), daß bei Böden mit größerer Kohäreszenz die beim Austrocknen eintretenden Volumänderungen gewisse Spannungen in der Masse zur Folge hätten, die sich in vertikaler, namentlich aber in horizontaler Richtung geltend machten:

„Der in der Oberfläche eintretende Wasserverlust bedingt zunächst eine Zusammenziehung der obersten Bodenschicht, wodurch ein Zug von unten nach oben ausgeübt wird.“ —

Auch Ramann[2]) berichtet von solchen Erscheinungen, besonders in Steppenböden, wobei er jedoch mehr die Rißbildung und Spaltung des Bodens in vertikaler Richtung im Auge hat.

Sehr wertvolle Angaben in dieser Beziehung finden wir an mehreren Stellen bei Schumacher[3]), dessen scharfe Beobachtung schon frühzeitig manche wichtige Beziehungen ahnen ließ und eine Fülle von beachtenswerten Hinweisen hervorbrachte, die viel zu wenig gewürdigt worden sind. In dem Kapitel „Gefüge des Bodens“ des erwähnten Werkes finden wir die Erscheinungen der „Selbstlockerung“ des Bodens in den ersten Anfängen beschrieben.

---

[1]) Wollny, Forschungen, Bd. V, S. 43.

[2]) Ramann, Bodenkunde, 3. Aufl. 1911, S. 328.

[3]) Schumacher, Der Ackerbau.

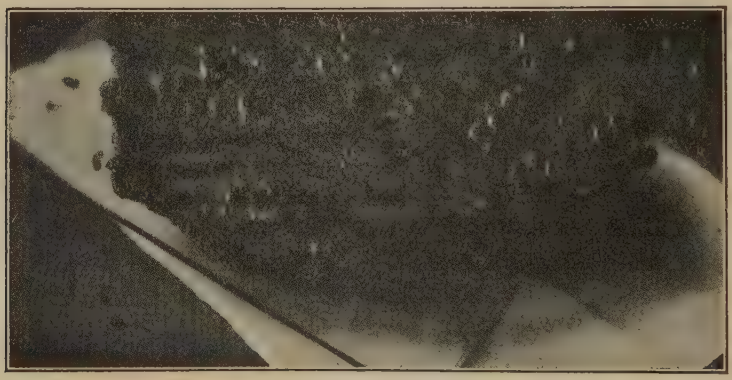
Schumacher fand u. a., daß ein Klumpen Lehm bei mehrmaliger Sättigung kapillar von unten mit Wasser und nicht zu langsamer Austrocknung jedesmal sein ursprüngliches Volumen etwas vergrößert hatte bis zu einem schließlichen Endzustand. Diese Art von Selbstlockerung gewinnt nun eine erhöhte Bedeutung, wenn beispielsweise ein durch die Pflugsohle verdichteter Untergrund in Schollen aufgebrochen wird und diese so Raum haben, bei Sättigung mit Wasser ihr Volumen zu vergrößern, sich also von selbst aufzulockern. Ohne diesen Aufbruch des Untergrundes in Schollen oder bei einer durch Übersättigung mit Wasser in natürlich dichtes Gefüge übergegangenen Ackerkrume — folgert Schumacher — hilft auch die Selbstlockerungsfähigkeit nichts, da die Bodenmasse nicht Raum hat, sich auszudehnen. Nur höchstens die oberste Schicht der Krume sei imstande, ihr Gefüge zu lockern, was aber in der Regel dadurch verhindert werde, daß bei solchen Bodenzuständen das Wasser nicht schnell genug nach unten abzuziehen vermöge und die oberste Schicht deshalb aufweiche und sich auf ihr natürliches Gefüge zusammenziehe. — Dieser Schluß ist zweifellos richtig und findet in der Natur überall dort seine Bestätigung, wo ein von Pflanzen unbeeinflußter Boden offen daliegt. Doch spielt bei diesen Vorgängen noch ein weiterer Prozeß herein, den auch Schumacher schon in seinen ersten Anfängen und Erscheinungsformen beobachtet hatte, jedoch nicht in Zusammenhang brachte mit jener Selbstlockerung. An anderer Stelle nämlich lesen wir:

„Beim Austrocknen bildet eine Tonmasse, wenigstens von solchem Ton, wie er gewöhnlich als Boden vorkommt (also mit den ihn begleitenden Stoffen), kleinste Schüppchen und Blättchen, die jedoch auch in ihrer Größe bei den verschiedenen natürlichen Tonsorten verschieden sind. Diese Schüppchen und Blättchen haften in trockenem Zustand natürlich fest aneinander. Je größer dieselben sind, um so leichter läßt sich die angefeuchtete Tonmasse zertrümmern.“

Diese Tatsache, daß gewisse Böden unter bestimmten Bedingungen in Schuppen und Lamellen aufblättern und durch solche Kohäreszenzverschiebungen eine wesentliche Umänderung ihrer Struktur erleiden, bildet eigentlich erst das Wesen der Selbstlockerung, sie steht aber auch in nächstem Zusammenhang mit den Folgen der Einwirkungen der Wurzeln auf den mechanischen Zu-

stand des Bodens. Es war deshalb notwendig, in dieser Richtung weitere Versuche anzustellen.

Zunächst gelang es mit verschiedenem Bodenmaterial, das durch Einschlämmen in dichteste Lagerung gebracht worden war, im Laboratorium durch schnelles Anfeuchten und scharfes Trocknen bei höheren Temperaturen die erwähnten Vorgänge der Blätterung rasch und äußerst deutlich zur Anschauung zu bringen, was bei Lehmen und ähnlichen tonreichen Materialien leicht und vollständig vor sich ging, bei mehr humushaltigen Böden schwieriger und langsamer erreicht wurde. Auch reiner Kaolin konnte in jenen Zustand versetzt werden. — In einer Anzahl von Tontöpfen wurde



Im Laboratorium künstlich hergestellte Blätterstruktur (Versuchsfeldboden).

ferner Lehm und Versuchsfelderde eingeschlämmt und nach dem Abtrocknen teils im Freien den Einflüssen der Witterung ausgesetzt, teils durch Überdecken mit Filtrierpapier und Sand und gleichmäßiges Begießen unter Dach ständig feucht erhalten, so daß keine wesentliche Austrocknung eintreten konnte. Während nun die ersteren Proben eine deutliche horizontale Spaltung nach einigen Monaten erkennen ließen, zeigte die Eröffnung der letzteren zunächst keine merkliche Veränderung und die Bruchflächen waren von gleichmäßig dichter Struktur. Erst durch einen parallel zur Oberfläche gerichteten Druck wurde eine eigentümliche Abspaltung horizontaler Platten und Plättchen wahrnehmbar. Diese Erscheinung wurde bei Versuchsfelderde weniger häufig und deutlich beobachtet, jedoch an Bodenarten ähnlicher Zusammensetzung

im Freilande sehr oft gesehen, besonders auch unter Pflanzenbeständen, so daß also auch hier die Selbstlockerung als eine auf Kohäreszenzverminderungen durch wechselnden Feuchtigkeitsgehalt bzw. wechselndes Austrocknen und Durchnässen beruhende Volumänderung im Innern der Bodenmasse zu deuten wäre[1]).

Schumacher hat für ganz ähnliche Erscheinungen eigentümlicher Volumänderungen in einer Tonmasse verschiedentlich plausible Erklärungen gegeben:

„. . . jedes Sandkorn zieht beim Austrocknen eine Partie Tonteilchen an sich, infolgedessen dann innerhalb der Masse des Tones eine Trennung eintreten muß, oder mit andern Worten feinste Rißchen sich bilden müssen. Daraus erklärt sich vielleicht die Eigentümlichkeit des Tones, sowie mehr oder weniger aller tonreichen Massen, daß sie bei der Zertrümmerung in Plättchen und Schüppchen zerfallen usw. . . .“

Auch Ramann erwähnt ähnliche Vorgänge:

„. . . Trocknet die oberste Bodenschicht ab, so vermindert sie ihr Volumen und kann sich dadurch von den tiefer liegenden Böden horizontal abheben.“

Eine ganze Anzahl von Arbeiten verschiedener Autoren, wie Ramann, Mitscherlich, Wollny, Daubrée, Haberlandt, Hilgard u. a., über die Kohäreszenzverhältnisse der Böden, Riß- und Spaltenbildung usw. gibt ähnliche Erklärungen einer Reihe solcher zu den Vorgängen der Selbstlockerung gehörender Verhältnisse, die voraussichtlich auch in Beziehung zu den Zustandsänderungen kolloidaler Substanzen stehen.

Als Bestätigung obiger Versuchsergebnisse brachten häufige Exkursionen in die Umgebung Münchens, besonders in die Lehmgruben von Bogenhausen und Föhring, zahlreiche schöne Beispiele jener Blätterstruktur, wie sie sich unter natürlichen Verhältnissen herausgebildet hatte. Dabei waren oft einzelne Schollen, die längere Zeit obenauf gelegen hatten, meist auf ihre ganze Tiefe in kleinere und größere Lamellen aufgespalten, während wieder andere Proben, die durch seitlichen Aufschluß aus dem Gesamtgefüge des Obergrundes gelöst wurden, selten tiefer als 5—10 cm zerblättert waren. Voraussetzung für das Auftreten der Erschei-

[1]) Gewisse Letten dichtester Struktur zerfallen bei Befeuchtung statt in Blätter und Schuppen in unregelmäßige scharfkantige Stücke, wobei sich Luftblasen in großer Menge entwickeln.

nung war jedoch stets, daß der betreffende Boden vorher mindestens bis auf sein natürliches, dichtes Gefüge zusammengelagert war; denn die genauere Untersuchung der einzelnen Schüppchen zeigte diese immer im Zustand der Einzelkornstruktur. — Ein besonders großartiges Beispiel für ein natürliches Vorkommen jener

a natürlicher Fund (Bogenhausen)
b Probe aus den Kulturen.

Selbstlockerung auf nicht bewachsenem Boden gaben die an den bei Föhring) zutage tretenden blaugrünen Schichten des sog. Flinzes. Hier in der häufig durch Hochwasser überfluteten äußerst dichten Masse fanden sich Stellen, die in einer Mächtigkeit bis zu 1 m vollständig zerblättert waren, in allen Abstufungen von Platten mit einigen Zentimeter Dicke bis zu den feinsten Schüppchen vom Bruchteil eines Millimeters. Im trockenen Zustand vermochte man

durch geringen Druck selbst große Platten in immer kleinere Ufern der Isar (z. B. zwischen Bogenhauser Brücke und der Fähre Spaltstücke zu zerlegen und endlich in ein lockeres Haufwerk kleiner eckiger Krümel überzuführen, während andere Flinzklumpen ohne solche Blätterung steinhart zusammengebacken waren.

Doch nicht nur durch wechselnden Feuchtigkeitsgehalt allein wird die Blätterung hervorgerufen, auch die Einwirkung des Frostes ließ eine ähnliche rasche Wirkung in dieser Richtung erzielen. Zwei größere Bodenkörper, Lehm und Versuchsfelderde, die durch Einschlämmen in dichteste Lagerung gebracht waren, wurden in durchnäßtem Zustande während einiger sehr kalter Tage und Nächte im Winter 1912 ins Freie gestellt und dem intensiven Froste (Temperatur bis -22^0 C) ausgesetzt. Nach dem Auftauen zeigte der Lehm an abgebrochenen größeren Schollen eine äußerst feine und zierliche Lamellierung in den Randpartien und an der Oberfläche, während der aus Versuchsfelderde hergestellte Klumpen in dieser kurzen Zeit noch keine Veränderung ersehen ließ. Es dürfte also auch für die Frostwirkung (zur Verstärkung jener Selbstlockerungsfähigkeit) die Beimengung von Humus verzögernd wirken. Auch Schumacher scheint diesen Umstand schon beachtet zu haben, denn er schreibt gleichfalls den „stärker gebundenen Böden — Lehmböden — eine größere Mürbung infolge Auflockerung des Gefüges“ zu.

Soweit zum weiteren Studium und Verständnis der reinen Wurzeltätigkeit im Boden notwendig, dürften durch obige Erörterungen die Verhältnisse der Selbstlockerung in dichten Böden hinreichend klargestellt sein. Um bei den folgenden Betrachtungen der Wurzeltätigkeit einerseits die aus ihr resultierenden, aktiv hervorgerufenen Strukturveränderungen von den Eigenbewegungen des Bodens auch in Richtung einer Verdichtung zu unterscheiden, andererseits aber gerade für die passive Anteilnahme der Wurzeln zur Verhinderung solcher und ähnlicher Vorgänge die richtige Grenze finden zu können, ist daran zu erinnern, daß umgekehrt locker gelagerte, nicht bewachsene Böden in die dichte Struktur übergehen können. So wird eine den Wirkungen des fallenden Regens ungeschützt ausgesetzte, in Krümelstruktur befindliche Bodenoberfläche sowohl mechanisch durch Zerschlagen der Krümel wie durch Auflösung derselben infolge rascher Sättigung und Überstauung mit Wasser in den Zustand des dichten Gefüges über-

geführt, und dies um so schneller, je feinkörniger und deshalb leichter fließbar die Bestandteile sind. „Der Boden stellt also immer wieder sein natürliches Gefüge bei der Aufweichung her, mag er sich in aufgelockertem Zustand befinden, oder über das natürliche Gefüge hinaus zusammengepreßt sein, vorausgesetzt, daß seine Masse in der Lage ist, sich frei ausdehnen zu können[1])."

Noch näher auf die theoretische Seite aller dieser Erscheinungen einzugehen, war kein Bedürfnis vorhanden; im Rahmen der in Untersuchung stehenden Fragen mußte es genügen, die betreffenden Verhältnisse im unbebauten Boden soweit klargelegt zu haben, als sie für die richtige Erkenntnis der Wurzeltätigkeit selbst vorbedingend sind. Wie aus dem folgenden hervorgeht, gestalten sich die mechanischen Veränderungen des Bodens unter dem Einflusse der Wurzeln und in Wechselwirkung mit den Eigenbewegungen des Bodens in verschiedener Weise, je nach den ursprünglichen Zuständen des Bodens selbst, seinem Wassergehalt, dann der Größe der Widerstände, die der Verschiebung der Erdteilchen entgegenstehen.

II. Wurzelwirkung im lockeren und dichten Boden mit Krümelstruktur.

Zuerst wurde untersucht, in welcher Weise sich die Wurzeln bei ihrer Fortbewegung in gekrümelter Erde den Platz hierfür verschaffen.

Wurden aus einem bestimmten Volumen von mit Pflanzen bestandenem Boden die darin verbreiteten Wurzeln ausgewaschen, so zeigte sich bei Gräsern eine solche Menge davon, daß man auf eine ausgiebige Erfüllung des Porenraumes mit Wurzeln schließen möchte. Man ist daher enttäuscht, bei genauer Messung des Wurzelvolumens eine verhältnismäßig geringe prozentische Anteilnahme desselben am Porenvolumen, wie am Gesamtbodenvolumen konstatieren zu müssen. Die Tabellen II und III zeigen zwar einige Male größere Zahlen für das Wurzelvolumen an, wie die von C. Kraus[2]) gefundenen Werte; dies ist jedoch darauf zurück-

[1]) Schumacher, Ackerbau, S. 41.

[2]) C. Kraus, Untersuchungen zu den biologischen Grundlagen des Grasbaues. Erste Mitteilung: Der Wurzelverlauf der Gräser. Fühlings Landw. Zeitung 1911, S. 344.

zuführen, daß in den vorliegenden Untersuchungen teils eine niedrigere Porositätszahl den Berechnungen zugrunde liegt, teils in die Bestimmungen des Wurzelvolumens auch alle unter der Erde befindlichen Pflanzenteile einbezogen wurden. Ferner wurde es manchmal notwendig, das Wurzelvolumen nicht auf Prozente des Porenraumes zu berechnen, sondern des Gesamtvolumens, um bei den Vergleichen der Wurzelverbreitung und Porosität in den Tabellen voneinander unabhängige Werte zu erhalten, die auf einheitlicher Grundlage aufgebaut sind; man würde sonst unter Umständen ein unklares Bild von der Wurzelverbreitung im Boden bekommen.

Die Bestimmungen der Porosität nun lassen zwar im lockeren Boden während der Dauer der Versuchsanstellung eine Abnahme der Hohlräume erkennen, wobei die Volumverminderung bei den einjährigen Kulturen auf Versuchsfeldboden ca. 5%, auf dem ursprünglich sehr locker und in groben Krümeln gelagerten Lehmboden ca. 10% beträgt, bei den zweijährigen Kulturen ca. 8% für Versuchsfeldboden und 15—20% für Lehmboden. Dieser Abnahme der Lockerheit gegenüber, die zum größten Teil auf der allmählichen Zusammenlagerung der Bodenteilchen beruht, erscheint aber der Einfluß der Wurzeln (eventuell durch Ausfüllung der Hohlräume) als ein sehr geringer, da nämlich die entsprechenden Unterschiede für bepflanzten und unbepflanzten Boden kaum einige Prozente ausmachen. Nach dem Gesagten braucht also im lockeren Boden auch bei anscheinend starker Durchwurzelung durch diese allein keine wesentliche Verminderung des ursprünglichen Lockerheitszustandes einzutreten, es kann trotz der Wurzeln noch ein ansehnliches Porenvolumen übrig bleiben. Selbst wenn man beispielsweise die Verringerung des Porenvolumens durch Setzen des Bodens und durch die Erfüllung mit Wurzeln zu insgesamt 15% rechnen würde, was nach den Bestimmungen in den Tabellen reichlich hoch ist, so würde bei einem ursprünglichen Porenvolumen von 60—70% bei normaler lockerer Einfüllung immer noch eine Porosität von 45—55% vorhanden sein, was nach anderweitigen und eigenen Erfahrungen hinsichtlich der physikalischen Verhältnisse des Bodens einen sehr günstigen Zustand darstellt.

Erst in den untersten Partien der Erde der Kulturgefäße, wo auch stets eine größere Feuchtigkeit herrschte, bestand das Bild stark aneinander gedrängter Krümel, die selbst eine geringere

Größe besaßen, und deren Zwischenräume meist durch noch feinere Partikelchen ausgefüllt waren. Infolgedessen beschränkte sich hier die Wurzeltätigkeit nicht mehr wie in den oberen Partien auf die bloße Beiseitedrängung der im Wege stehenden Krümel, sondern sie bewirkte durch Pressung und Deformation der nicht mehr so leicht ausweichenden Bodenteilchen bei dem erwähnten größeren Feuchtigkeitsgehalte der unteren Teile eine röhrenartige Verdichtung im Verlaufe des Vordringens der Wurzelspitze. Die glänzenden Wandungen solcher „Röhren", die sich durch eine teilweise Verschmierung der Krümel und Überführung in Einzelkornstruktur kennzeichneten, wurden im Verlaufe vorsichtiger Abgrabungen des Inhaltes der großen bebauten Blechgefäße (siehe Einleitung!) des öfteren mit teils lebenden, teils verrottenden Wurzelstücken bloßgelegt. Dabei waren aber immer noch zahlreiche kleinere Zwischenräume in den umgebenden Verbänden von Krümeln vorhanden, die in diese Gänge der Wurzeln ausmündeten und so der Ausbildung und Verbreitung von Nebenwurzeln günstige Verhältnisse boten. Ähnliche Erscheinungen lokaler Verdichtung waren z. B. in der nächsten Umgebung von stark in die Dicke gewachsenen lebenden Luzernewurzeln oder im Bereiche der zahlreich in kurzen Abständen abgehenden Seitenwurzeln einer Bohnenpflanze und dgl. vorhanden. Bei der Art, in der sich die Druckwirkungen äußern, spielen neben der Größe der den Erdverschiebungen entgegenstehenden Widerstände gerade die Feuchtigkeitsverhältnisse eine große Rolle; statt der Kompressionen können auch Sprengungen der Erde stattfinden, wie z. B. die Radialsprünge bei stark in die Dicke wachsenden Pflanzenteilen (Rüben[1]) sowie das Aufreißen der Kartoffeldämme durch die wachsenden Knollen zeigen.

Zur besseren Veranschaulichung und Verfolgung der Wurzeltätigkeit beim Vordringen der Wurzeln im lockeren Boden wurden in einigen großen, mit krümeliger Erde eingefüllten Glasstutzen in der Nähe der Gefäßwandungen Bohnensamen und Getreidekörner gelegt, um die sich entwickelnden Wurzeln von außen her bei ihrem Wachstum in die Tiefe verfolgen zu können. Durch

[1]) C. Kraus, Die Wachstumsweise der Beta-Rübe (Naturwissensch. Zeitschrift f. Land- u. Forstwissensch., Bd. I, Sep.-Abdr. S. 14). Die Wirkungen sind je nach der Rübenform verschieden. A. a. O. ist auch gezeigt, daß die aus der Erde wachsenden Rüben die Erde auch durch Emporheben lockern.

öftere Fixierung des Standes der Wurzelspitze konnte die Abwärtsbewegung beobachtet werden und zugleich die Tatsache, daß die kräftigen Seitenwurzeln die Krümel zur Seite drängten und in gerader Richtung der Wandung entlang abwärts liefen. Auch hier war der Raum zwischen den Krümeln so groß, daß eine wesentliche Veränderung der Struktur auch in nächster Nähe der vordringenden Wurzel nicht eintreten konnte. Erst nachdem sich einmal in den oberen Schichten zahlreiche Nebenwurzeln von der Hauptwurzel der Bohnen aus in den Bodenraum verbreitet hatten, fand hier in dem dichter gewordenen Geflecht von Wurzeln eine Pressung der Krümel statt, was ihre enge Aneinanderlagerung und teilweise Zertrümmerung zur Folge hatte. War dazu der Feuchtigkeitsgehalt ein entsprechender, so wurden auch hier deutliche Wurzelspuren gefunden, d. h. durch Pressung und Reibung seitens der vordringenden Wurzeln an dem nassen Boden hervorgerufene verschmierte Wandungen. — Die weit feineren Wurzeln der Getreidepflanzen jedoch waren nicht bloß in den Zwischenräumen der Krümel verbreitet, sondern häufig in ihre Poren selbst eingedrungen, ohne während der Dauer dieses Versuchs sichtbare Veränderungen bewirkt zu haben.

Diese Beobachtungen stehen im Widerspruch zu den Ansichten, welche eine ständige Verschlechterung der Bodenstruktur durch die Ausbreitung der Wurzeln annehmen. In diesem Sinne spricht sich z. B. P. Vageler[1]) aus:

„. . . Die Pflanze selbst ist teils passiv, da sie sich den Boden nicht verbessern kann, sondern mit dem Gebotenen vorlieb nehmen muß; teils bereitet sie aktiv durch ihr eigenes Wachstum, das die Bodeneigenschaften verschlechtert, speziell den Luftgehalt verringert, einer in der Richtung auf endliche Hochmoorbildung fortgeschrittenen Folgeformation den Weg. Diese Verringerung des Luftgehaltes geschieht anscheinend durch Verfilzung der Substanz des Bodens unter dem Einflusse der Wurzeln, vor allem aber durch Anstau von Wasser.“

Eine solche ständige Verschlechterung des Bodens ist wohl denkbar, sie braucht aber noch nicht eine allgemeine Folge der Wurzeln zu sein, denn wie die eingehenden Untersuchungen in vorliegender Arbeit gezeigt haben, ist die Pflanze wohl befähigt, ihren Standraum mit Hilfe der natürlichen Selbstlockerungsvor-

[1]) P. Vageler, Mitteilungen der Bayr. Moorkultur-Anstalt 1907, Heft 1.

gänge zu verbessern und auch einer Verdichtung durch die Einwirkung der Atmosphäre entgegenzuarbeiten. Wo natürlich die hierfür nötigen Bedingungen fehlen, wo insbesondere durch langdauernden Wasserüberschuß und zeitweise gänzliche Überstauung des Bodens jene günstigen Wirkungen von Kohäreszenzverschiebungen nicht zur Geltung kommen können, ist eine ständige Verdichtung und Verschlechterung der physikalischen Verhältnisse wohl zu verstehen, besonders wenn noch ungünstige chemische Umsetzungen statthaben oder durch übermäßige Humusanreicherung (wie auf den von Vageler besprochenen Hochmoorböden) eine starke Überhöhung des möglichen Wassergehaltes bedingt wird. (Weiteres siehe im letzten Abschnitt: Eindringen von Wasser usw. usw.)

Begnügen wir uns vorläufig mit der Feststellung der Tatsache, daß die Wurzeln durch ihr Wachstum und ihre Verbreitung im lockeren Boden sowie durch die Größe ihres Volumens keine Verdichtung im eigentlichen Sinne hervorrufen, sondern höchstens eine engere gegenseitige Anlagerung der Krümel und Bodenteilchen, oder allenfalls bei dichter Lagerung und größerer Bodenfeuchtigkeit nur lokale Verdichtungen bewirken, so müssen wir eine Verschlechterung des mechanischen Zustandes des Bodens durch die Wurzeln nach dieser Richtung in Abrede stellen, dichtere Lagerung unter dem Einfluß der Wurzeln würde im Gegenteil sogar eine Verbesserung der Bodenstruktur bedeuten, wenigstens insoweit die Verdichtung nicht über gewisse Grenzen hinausgeht. Dies wird durch die Entwicklung und Produktion der eingangs beschriebenen, in den viereckigen Lysimetern befindlichen Kulturen von Lolium perenne und Trifolium pratense in lockerem und dichtem Versuchsfeldboden bestätigt, während in dem Versuchslehmboden die Erträge des nicht verdichteten Bodens vorausstanden. — Schon wenige Wochen nach der Anlage und im Verlaufe des ganzen ersten Vegetationsjahres war die oberirdische Entwicklung auf dichtgelagertem Versuchsfeldboden auffallend üppiger und reicher als jene auf lockerem, auf Lehmboden dagegen waren — wie gesagt — jene Unterschiede in umgekehrter Richtung erkennbar. Bei der intensiven Verdichtung, welche das Einstampfen des feuchten Lehms erzielen ließ (siehe Einleitung!), überwog natürlich der Widerstand gegen die eindringenden Wurzeln gegenüber der günstigen Aneinanderlagerung der durch Einstampfen

nicht zerstörten Krümel im Versuchsfeldboden. Düngung und Wasserzufuhr waren gleichmäßig über alle Kulturen verteilt und kamen für diese Unterschiede nicht in Betracht. Durch eine zweimalige Ernte wurden diese Verhältnisse zahlenmäßig festgelegt (siehe Tabelle I).

Diese Ergebnisse beweisen jedoch zunächst nur, daß unter den Bedingungen einer Gefäßkultur die Pflanzen in verdichtetem Boden besser gewachsen sind. Wie weit dies aber oder unter welchen Voraussetzungen es für die Freilandskulturen Geltung hat, ist daraus nicht ohne weiteres zu ersehen. — In einer inzwischen erschienenen Arbeit von R. Polle[1]), worin auch Versuche über den Einfluß verschiedener Festigkeit des Bodens auf die Wurzelentwicklung speziell von Weizen und Gerste mitgeteilt sind, werden in Bestätigung des Obigen auch für diese Pflanzen ähnliche Resultate über den Mehrertrag an oberirdischer Substanz auf festem Boden gegenüber auf lockerem festgestellt.

Was die Frage nach dem Grunde jener Erscheinungen betrifft, so erklärt Polle zunächst „die bessere Bewegung des Wassers in festem Boden", vor allem aber die „größere Flächenberührung der Wurzeln mit den Bodenpartikelchen" als Hauptursache. Dies wird auch bis zu einem gewissen Grade zutreffen, jedoch ohne daß bei der Unbestimmtheit des Begriffes „fester Boden" Verallgemeinerungen zulässig sind. Leider hat Polle keine Bestimmung der Porosität seiner durch Einstampfen erhaltenen „festen Böden" vorgenommen, doch steht zu vermuten, daß auch bei seinen Versuchen das Porenvolumen nicht erheblich unter 35% war, da durch bloßes Stampfen der lockeren Erde eine gewisse Elastizität der mit Luft erfüllten Teilchen eine stärkere Verdichtung sehr verhindert, ja bei ungünstigem Feuchtigkeitsgehalt — wie eingangs gezeigt — überhaupt nicht erzielen läßt. Durch die äußerst enge Aneinanderlagerung der Krümel — denn diese werden durch Einstampfen nicht oder doch nur teilweise zerstört — findet die eindringende Wurzelspitze eine allseitige Widerlage, die ihr beim Vordringen eine gewisse Führung verleiht, um ihre Druckkräfte vollständig zur Geltung kommen zu lassen, ohne dabei auf allzu großen Widerstand seitens des Bodens zu stoßen, verbunden mit einer größeren Flächenberührung mit den Bodenpartikelchen.

---

[1]) R. Polle, Inaugural-Dissertation, Göttingen 1910.

III. Wurzelwirkung im dichten Boden mit Einzelkornstruktur.

Anders verhält es sich hinsichtlich der durch die Wurzeln hervorgerufenen mechanischen Veränderungen der Bodenstruktur, sobald wir die betreffenden Vorgänge an wirklich dichtem, auf ein Mindestmaß von Porenvolum gebrachtem Bodenmaterial betrachten, wo nicht mehr Krümelzustand, sondern Einzelkornstruktur herrscht.

Im bindigen, verdichteten, in Einzelkornstruktur liegenden Boden, der beim Vordringen der Wurzel ausreichend feucht ist, hinterläßt diese durch intensives Zusammenpressen der Bodenteilchen und noch weitere Verringerung des Hohlraumvolumens, das ja auch bei engster Lagerung bekanntlich noch um 26% herum beträgt, stets eine deutlich sichtbare glänzende Wandung, sie bildet ähnlich einer konisch verjüngten Nadel, die man in solches Material einbohrt, eine Röhre, sei es nun das feine Kanälchen einer gewöhnlichen Gramineenwurzel oder der mehrere Zentimeter Durchmesser fassende Gang einer Baumwurzel. Verrotten nach Absterben der Vegetation diese Wurzeln und verschwinden sie bis auf Reste und schließlich ganz aus den Röhren, so bleibt wohl ein Teil von diesen erhalten, während bei den übrigen, besonders jenen von größerem Querschnitt, durch Spannungsverschiedenheiten infolge rascheren Wechsels von Trockenheit und Nässe, sowie durch die Gefügelockerung bei Wasseraufnahme die verdichteten Wandungen springen und zusammenfallen, eine Beobachtung, die bei eigens zu diesem Zweck angestellten Nachgrabungen nicht selten gemacht wurde. Daß gerade im Löß und ähnlichen Bodenarten diese Röhren durch Abscheidung von $CaCO_3$ besonders haltbar werden, so daß die dadurch hervorgerufene Porenstruktur zu einem Charakteristikum solchen Materials wird, dürfte zutreffen. Im übrigen aber ist zu bemerken, daß größere und kleinere Hohlräume verschiedener Form, rundlich, röhrenförmig gestreckt usw., wie man sie in dicht gelagerten, bindigen Böden in Einzelkornstruktur so häufig beobachtet, durchaus nicht allgemein, ja zum größten Teil überhaupt nicht auf die Wirkungen von Wurzeln zurückgeführt werden können[1]). Abgesehen davon, daß solche Pseudowurzelröhren durch die Tätigkeit verschiedener

[1]) Z. B. Vorkommen der „Röhren" in tieferen Schichten von Lehmlagern usw., wo Wurzeltätigkeit ausgeschlossen ist.

größerer und kleinster Wurmarten entstanden sein können, entstehen sie nachweisbar durch Veränderungen beim vollständigen Durchfeuchten und Wiederaustrocknen solcher Böden (besonders von eingeschlämmtem Lehm), wahrscheinlich hervorgerufen durch eingeschlossene Luftbläschen, sowie durch Vorgänge der Selbstlockerung in der von Schumacher gegebenen Auffassung (siehe Einleitung!). Nach den weiterhin zu berichtenden Versuchen ist die Bedeutung solcher wirklicher oder vermeintlicher „Wurzelröhren", wie sie von manchen Autoren in der Richtung angenommen wird, daß dadurch die Verbreitung der Wurzeln einer folgenden Vegetation in einem dichten Untergrund gefördert werden soll, ganz wesentlich einzuschränken oder mindestens als noch viel zu wenig durch tatsächliche Beobachtungen bewiesen anzusehen. Einzelne dafür sprechende Beobachtungen dürfen durchaus nicht ohne weiteres verallgemeinert werden, so die unter bestimmten Bedingungen gemachte Feststellung, daß die Durchbohrung einer für die Wurzeln der einen Pflanzen undurchdringbaren Schicht relativ geringer Mächtigkeit durch die von vorausgegangenen, kräftig wurzelnden anderen Pflanzen einer unmittelbar folgenden Vegetation den Durchtritt in den darunter liegenden Boden erleichtert hat[1]).

Auf mehreren, durch sog. Wurzelröhren stark porösen, aber trotzdem stark gebundenen Lehmschollen (ca. ½—1 cdm Volum) wurde englisches Raygras aufgesät, mit lockerer Erde bedeckt und mäßig feucht erhalten. Nachdem die Wurzeln bereits unten aus den Schollen hervortraten und das Gras selbst einige Zentimeter hoch gewachsen war, wurden die Schollen aufgebrochen und nach dem Verlauf der Wurzeln durchsucht. Die größere Masse hatte sich in den Randpartien ausgebreitet, und manchmal waren von da einige Würzelchen ins Innere gedrungen. Von den immerhin zahlreichen Wurzeln aber, die geradewegs von oben durch den dichten Lehm gedrungen waren, fand sich höchst selten eine in einem der bereits vorhandenen Röhrchen; sie waren fast ausnahmslos direkt in den Boden gedrungen, ohne von der durch die Röhrchen gebotenen „Erleichterung" Gebrauch zu machen. Dieses Verhalten ist unschwer zu erklären, wenn man bedenkt, daß diese Röhren und sonstige Hohlraumformen keine vollständig

[1]) Schultz-Lupitz, Arbeiten der D. L. G., Heft 17.

von oben bis unten offenen Kanäle darstellen, sondern meist nur auf kurze Strecken und in den verschiedensten Richtungen verlaufen. Es kommt daher vor, daß die Wurzeln in ihrem Verlaufe überhaupt erst nach einiger Zeit auf solche offene Röhren und Hohlräume stoßen. Aber auch dann haben sich Erscheinungen gefunden, die nur selten als günstig für die Wurzeln angesprochen werden könnten. War nämlich der Neigungswinkel der Röhre zur Angriffsrichtung der Wurzel nicht allzu gestreckt und der Durchmesser der Röhre nur sehr gering, so durchbrach die Wurzelspitze beim Weiterwachsen die gegenüberliegende Wand der Röhre, ohne in diese auszubiegen. Sowie jedoch das Lumen eines solchen Hohlraumes (Röhre und dgl.) beträchtlicher wurde, verlor die Wurzel ihre Führung; infolge der fehlenden seitlichen Stützung konnte sie dem Widerstand des dichten Bodens nicht mehr ihre volle Kraft entgegensetzen und die andere Wandung des Hohlraumes durchdringen; es traten Verbiegungen ein, bis schließlich die Wurzelspitze der Wandung des Hohlraumes entlang gleiten und ihr Längenwachstum fortsetzen konnte. War der in Frage kommende Hohlraum röhrenartig und von solchem Querschnitt, daß ihn die betreffende Wurzel nicht durch ihre Dickendimension ausfüllte, was besonders bei den feinen Wurzeln der Gramineen meistens nicht der Fall ist[1]), so saß die Wurzelspitze richtig gefangen, falls nicht die Röhre so lang war, um in ein lockeres Medium zu führen. Im ersten Fall aber traten ganz eigenartige Erscheinungen ein: Die eingesperrte Wurzelspitze wurde durch das weitere Längenwachstum der Wurzel nach entsprechender Umbiegung am geschlossenen Ende der Röhre wieder in die Höhe geschoben; solche Schleifenbildungen konnten öfter beobachtet werden, wobei sich die Wurzelenden rankenartig aufgewunden hatten. Besonders schön wurden solche Vorkommnisse in mehr rundlichen Hohlräumen gefunden. Meist waren dann die Wurzelenden abgestorben und mit Eisenoxyd überkrustet, und die betroffenen Wurzelteile hatten teilweise den ganzen Hohlraum mit einem dichten Gespinst feiner Wurzelhaare erfüllt. Aus diesen Ermittlungen geht also hervor, daß die Wurzeln im allge-

[1]) Natürlich sind auch die Spitzen, mit denen Luzerne u. a. tiefwurzelnde kleinsamige Gewächse im Erdboden vordringen, sehr dünn, erst mit Beginn des Dickenwachstums werden die feinen Kanäle, die sich die Spitzen hergestellt haben, durch seitlichen Druck erweitert.

meinen nur selten imstande sind, trotz der hohen, ihnen zur Verfügung stehenden Druckkräfte von den sog. Wurzelröhren in einem stark verdichteten Boden Gebrauch zu machen, falls sie sich nicht rechtzeitig und unter dem Einflusse des Widerstandes beschleunigt und in höherem Maße ausreichend zu verdicken (siehe unten!), dadurch nicht zu weite Röhren auszufüllen vermögen und so die nötige Führung erhalten, um die gegebene Widerlage zu durchbohren oder Sprengwirkungen auszuüben. Wollny[1]) hat übrigens zwei hier einschlägige Arbeiten von Hensen und Darwin über die Bedeutung der Regenwurmröhren auch in dem Sinne kritisch gewürdigt, daß er eher ungünstige Verhältnisse in den Röhren für das Pflanzenwachstum annimmt als günstige.

Man hat den „Wurzelröhren" eine Bedeutung für die Vegetation nicht nur in der Richtung zugeschrieben, daß die Verbreitung der Wurzeln in die Tiefe erleichtert werden soll, sondern daß sie auch für die Wasserverbreitung aus der Krume in den Untergrund von großer Wichtigkeit seien. So ist Causemann[2]) der Meinung, daß beispielsweise die Wurzelröhren der Luzerne „jeden Überschuß an Wasser in die Tiefe leiten und die Krume vor Übersättigung schützen"[3]). Selbst wenn wir nicht einen regelmäßig bearbeiteten Boden in Betracht ziehen, bei welchem nämlich durch die Ackergeräte eine solche Durchmischung stattfindet, daß eine Erhaltung der Wurzelröhren nur in seltenen Fällen erwartet werden kann, haben die einschlägigen Untersuchungen an dicht gelagerten Böden gelehrt, daß gerade die größeren Wurzelkanäle meist bald einfallen oder auch durch Einschlämmungen verschlossen werden, oder sie sind von den Wurzeln einer folgenden Vegetation ausgefüllt und, wo dies nicht der Fall ist und die Humussubstanz der verrottenden Wurzeln aus ihnen verschwindet, wird fraglich sein, ob jene beliebig geneigten und meist blind endigenden Röhrchen zur beschleunigten Wasserbewegung aus der Krume in den Untergrund etwas merkliches beitragen. Eine wenn auch langsam verlaufende Förderung der Bewegung in den Untergrund mag stattfinden, wenn diese Röhren

---

[1]) Wollny, Forschungen, Bd. V, S. 423 ff.

[2]) D. Landw. Presse, 31. Jahrg., Nr. 36.

[3]) Über diese mit der Lagerung des Getreides in Zusammenhang gebrachten Verhältnisse siehe Kraus, Die Lagerung der Getreide, S. 373.

dem Wasser frei zugänglich bleiben; das den Wandungen entlang sich bewegende Wasser wird von da aus kapillar aufgenommen, so daß sich die Erde in der Umgebung der Kanälchen mit Wasser sättigt. Aber keinesfalls werden die Röhrchen so rasch wirken können, um die Krume von einer, wenn auch nur vorübergehenden Übersättigung mit Wasser überhaupt zu schützen. Würden übrigens die sog. Tiefwurzler den dichten Untergrund in der gedachten Weise durchlöchern, so müßte dieser bei alten Kulturböden ganz deutlich porös geworden sein, zumal ja auch die flacher wurzelnden Gewächse in den festen Untergrund zu dringen vermögen. Ein derartig poröser Untergrund konnte aber bei keiner Nachgrabung gefunden werden, und meistens beschränkte sich diese Erscheinung nur auf ganz geringe Spuren einer früheren Durchwurzelung. Ja selbst an Aufschlüssen, wo das Wurzelwerk von mächtigen Bäumen zutage trat, war von offenen Wurzelröhren selten viel zu sehen, im Gegenteil war auch hier häufig die Struktur locker und lose. Aber gerade jene Porenstruktur des Lehms, welche ihren Ursprung von ehemaligen Wurzeln einer Grasvegetation nehmen soll, beweist die Unfähigkeit solcher „Wurzelröhren“ für die beschleunigte Wasserbewegung nach unten am besten, denn auf solchen Böden sehen wir bei raschen stärkeren Niederschlägen sofort Pfützen entstehen, wobei die oberste Schicht des Bodens breiig aufweicht, schon in geringer Tiefe aber vollständige Trockenheit herrscht. Die vermeintlichen Wurzelröhren kommen überhaupt nicht zur Geltung.

Zu obigem seien einige Äußerungen von Pfeffer über die mechanische Wirkung der Wurzeln mitgeteilt:

„Um die maximale mechanische Leistung ausüben zu können, muß natürlich die genügende Widerlage gegeben, ein Zurückweichen und Ausbiegen ausgeschlossen sein; die Wurzel muß allseitig eingeschlossen sein, da sie sonst ausbiegt und ausweicht.“

„Bildet ein lockerer Erdboden die Führung und Widerlage, so vermag die senkrecht auftreffende Wurzelspitze nur einen mäßigen Druck zu entwickeln.“

„Ebenso ist es ohne weiteres klar, warum es zu Ausbiegungen und schließlich zu eigentümlichen Schleifenbildungen kommt, wenn die äußere Wurzelspitze und der Same fixiert, der zwischenliegende Wurzelteil aber ohne genügende Widerlage ist . . .“

„Doch ist nicht zu vergessen, daß eine noch so gute Veranke-

rung des älteren Wurzelsystems das Ausbiegen der jungen Teile einer Wurzel nicht verhindern kann, wenn der Mangel einer geeigneten seitlichen Widerlage ein solches Ausbiegen gestattet."

„Wie die gemessenen Drucke nach Längs- und Querrichtung lehren, erzeugen die eingeschlossenen Wurzeln einen allseitigen Druck . . ."

„Bei mechanischer Hemmung des Längenwachstums erfährt der Spitzenteil der Wurzel ein gefördertes Dickenwachstum, das ihn zum Anschmiegen und zum Wirken gegen Formen bringt, deren Durchmesser andernfalls dieser Wurzelteil nicht erreicht haben würde."

„Die Wurzel bahnt sich also durch Sprengung vermittels Keil- und Hebelwirkung ihren Weg durch ein Medium, das die Energie des direkten Spitzendrucks nicht zu durchbrechen vermag."

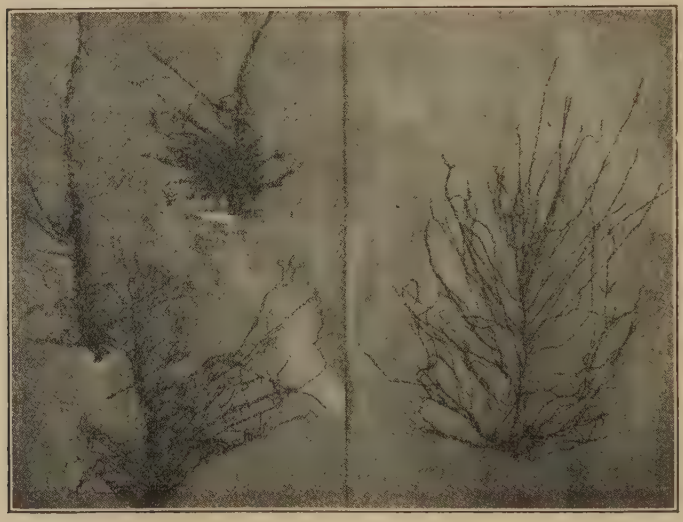
Eine Erweiterung zu obigen Beobachtungen ergibt sich aus der Vergleichung der Wurzelformen im dichten und lockeren Boden. Aus einer Anzahl vorsichtig ausgewaschener Wurzelmassen wurden typische Exemplare ausgewählt und unter Wasser auf Papier aufgebracht und nach dem Abtrocknen photographiert (siehe Tafeln). Diese Bilder lassen auch gewisse Übereinstimmungen mit den in der zitierten Arbeit von Polle an Gerste und Weizen erhaltenen Versuchsresultaten hinsichtlich der Wurzelformen im festen und lockeren Boden erkennen. Dabei dürfen allerdings die mehrfach betonten Unterschiede eines nur durch Einstampfen erhaltenen festen Bodens gegenüber der viel intensiveren Verdichtung durch Einschlämmen und Lagerung in Einzelkornstruktur nicht aus dem Auge gelassen werden.

Das Wurzelsystem von Vicia faba und Trifolium pratense (als Vertreter der Pfahlwurzler) zeigt ausgeprägte Unterschiede im lockeren und dichten Boden. Während die im lockeren Boden gewachsenen Pflanzen längere Wurzeln und vor allem eine nur wenig in der Stärke die Nebenwurzeln übertreffende Pfahlwurzel ausgebildet haben, zeigt diese bei den Pflanzen des dichten Bodens ein äußerst starkes Dickenwachstum als Korrelation der Wachstumshemmung in Richtung der Längsachse. Zugleich ist hier die gleichmäßige Entwicklung von Seitenwurzeln zurückgedrängt und in der Nähe der Bodenoberfläche reichlicher. Die abgebildeten Exemplare von Vicia faba stammen aus dich-

tem Lehmboden, der in ähnlicher Weise wie in Fig. IIAa in den oberen Partien starke Lamellierung nach horizontaler Richtung aufwies. Es liegt nahe, die auffallend oberflächliche Seitenwurzelbildung bei jenen Pflanzen damit in Zusammenhang zu bringen.

Die Neigung der Pfahlwurzel der im dichten Boden gewachsenen Kleepflanzen, besonders häufig zu gabeln, stellt gleichfalls eine Reaktion gegen das erschwerte Wachstum in vertikaler Richtung dar.

Bei den Büschelwurzlern (Lolium perenne und Avena sativa)



Lockerer Boden. Vicia faba. Dichter Boden.

kann im allgemeinen beobachtet werden, daß im dichten Boden eine derbere Ausbildung der Wurzeln erfolgt, ferner die Anlage von feineren Seitenwurzeln in den mittleren Teilen oft beträchtlich hintangehalten wird. Dagegen ist gegen die Enden zu eine büschelförmige Verzweigung entstanden, besonders auffällig beim Hafer. Sie ist anzusehen als eine Folge der erschwerten Fortbewegung der Wurzelspitze, indem dafür korrelativ eine verstärkte Ausbildung der Seitenwurzeln stattfand und dadurch eine Vermehrung der Druckwirkung auf den umgebenden Boden. Im übrigen aber haben gerade die Getreidepflanzen so stark unter der intensiven Verdichtung des Bodens gelitten, daß hier mehr

von einer krankhaften Verkrüppelung des Wurzelsystems gesprochen werden muß.

Die einschlägigen Versuchsergebnisse von Polle lauten:

„Zweifellos muß gefolgert werden, daß die Wurzeln des festen Bodens dicker und derber ausgebildet sein müssen als die des lockeren. — — Es ist deshalb zu verstehen, daß trotz längerer Wurzeln das absolute Wurzelgewicht im lockeren Boden niedriger ist als im festen."

Ferner konnte er beobachten, „daß im festen Boden die Nebenwurzelbildung bereits an den oberen Teilen der Haupt-

Lockerer Boden. Dichter Boden.
Trifolium pratense.

wurzeln begann und nach unten hin allmählich abnahm, während sie im lockeren Boden hauptsächlich am unteren Ende der Hauptwurzeln stattfand", was hier allerdings nur auf den jeweilig größeren Gehalt an Wasser und Nährstoffen in den oberen bzw. unteren Partien der dichten und lockeren Böden zurückgeführt wird.

IV. Lockerungsvorgänge im Zusammenwirken von Wurzeltätigkeit und Selbstlockerung.

Nach den vorausgehenden Erörterungen über die Wurzelwirkung sowie die Erscheinung der Selbstlockerung wird es möglich werden, manchen bisher noch wenig geklärten Vorkomm-

nissen bezüglich des Einflusses verschiedener Pflanzenbestände auf die Bodenstruktur des Freilandes näherzukommen.

Sehr deutlich tritt die Wechselwirkung von Selbstlockerung und Wurzeltätigkeit in folgenden Versuchen hervor:

Verschiedene aus natürlich und künstlich hergestelltem dichten Bodenmaterial bestehende Stücke von Faustgröße wurden in Glasschalen gestellt und durch Begießen einer auf dem Grund der Schalen befindlichen Sandschicht mäßig feucht erhalten. Auf diese Proben wurden vorgequellte Samen von Bohne und Mais gebracht, mittels kleiner Drahthaken fixiert und für das vordringende erste Würzelchen ein kleiner Kanal ins Innere des Bodens vorgebohrt. Schon nach wenigen Tagen waren die Keimlinge soweit entwickelt, daß sie ihre Wurzeln einige Zentimeter unter der betreffenden Scholle herausgeschoben hatten. Alle Schollen aber waren gesprengt und zeigten klaffende Risse. Die Wurzeln selbst hatten zuerst den vorgebohrten Kanal vollständig durch Verdickung ausgefüllt und waren dann in gerader Richtung nach abwärts in den äußerst dichten Boden gedrungen, wobei sie nach Austritt aus der Scholle, innerhalb der sich ihre Dicke plötzlich erheblich vermindert hatte, den normalen Umfang wiedererlangten. Bei den noch länger belassenen Proben zeigte sich allmählich eine reiche Entwicklung von Seitenwurzeln, die ihrerseits die Sprengung und Lockerung des Gefüges in Richtung der Horizontalen fortsetzten, so zwar, daß ihre Wirkung nach außen nicht immer wahrnehmbar wurde, jedoch beim Zerbrechen der Scholle sich durch eine gewisse Spaltbarkeit in der Ebene der eingedrungenen Wurzel verriet. Die weitere Wirkung solcher Seitenwurzeln war augenscheinlich wesentlich durch den jeweiligen Feuchtigkeitsgehalt variiert. So zeigte sich z. B. die Spur der Wurzel bei größerem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens stets als ein gerader Kanal mit glänzender Wandung, während sonst manchmal, besonders in der Umgebung der Pfahlwurzel, wo die reichste Seitenwurzelentwicklung stattfand, eine ausgesprochene Absprengung kleiner, eckiger, blättchenartiger Partikel in Erscheinung trat. Im Falle eines geringen Feuchtigkeitsgehaltes fanden sich die Schollen auch häufig in mehreren Richtungen, radial vom Gang der Pfahlwurzel ausgehend, zersprengt, wie es auch bei Rüben (siehe S. 22) beobachtet wurde.

Von den Vorgängen im Freiland ist in erster Linie die bislang noch den verschiedensten Meinungen unterworfene sog. „Beschat-

tungsgare" zu besprechen. Während nämlich die meisten Autoren den Einfluß der Pflanzen auf die hier in Betracht kommenden Zustände lediglich darauf beschränken, daß die oberirdischen Teile bei dichtem Stande den Boden bedecken und damit die verschlämmende Wirkung des fallenden Regens verhindern, haben andere[1]) die Vermutung ausgesprochen, daß vielleicht doch die

Wurzeln dabei beteiligt sein könnten, und nicht bloß den lockeren Zustand von einstiger Bearbeitung her erhalten, sondern sogar vermehren könnten. Wieder ist es Schumacher, der längst ähnliche Erscheinungen beobachtet hatte, ohne, wie er selbst sagt,

[1]) Z. B. Ebermayer & Hartmann, Abhandlungen des Bayr. Hydrot. Bureaus 1904.

„sich eine allseitig genügende Rechenschaft“ darüber geben zu können. Wir lesen dort [1]):

„Bei stärker gebundenen Böden — Lehmböden — wird wohl die Mürbung oft unter guter Beschattung größer infolge einer Auflockerung des Gefüges der Erdbröckchen durch eine passende Durchfeuchtung usw. Ob anderweitige Vorgänge eine Erhöhung

Trifolium pratense in dichtem Versuchsfeldboden.

des Lockerheitszustandes herbeizuführen vermögen, würde sich nur durch exakte Untersuchungen erkennen lassen . . .“

„Nur an der Oberfläche oder in den oberen Zentimetern des Bodens haben wir bei geschlossen stehendem Raps, Buchweizen, Klee sowie bei Erbsen häufig eine entschiedene Auflockerung gefunden . . .“

Derartige Verhältnisse wurden in den angelegten Versuchskulturen reichlich in allen Stadien beobachtet und studiert, vor

[1]) Schumacher, Ackerbau, S. 244 ff.

allem aber durch Nachgrabungen im Freilande, sowohl in den Parzellen des Versuchsfeldes wie auch überall auf freiem Felde beinahe auf Schritt und Tritt wiedererkannt. So ergab beispielsweise die im Sommer 1912 vorgenommene Untersuchung der Erde verschiedener Kulturen in großen Blechgefäßen aus dem Jahre 1911 mit Vicia faba in dichtem Lehm und Versuchsfeldboden folgende interessante Aufschlüsse.

Der eingestampfte Lehmboden zeigte unter einer geringen Decke lockerer Versuchsfelderde die schon oben auch an eingeschlämmtem, nicht bewachsenem Bodenmaterial konstatierte Lamellierung nach horizontaler Richtung in der Nähe der Oberfläche. Zahlreiche Wurzelpakete verliefen in diesen Querspalten und erschienen häufig bandartig breitgedrückt, was durch die erwähnten Erscheinungen der regulatorischen Formveränderungen der Wurzeln bei gehemmtem oder erschwertem Längenwachstum erklärlich wird. „Es zeigte sich eine korrelative Wachstumsbeschleunigung, indem die Wurzel nicht allein das normal angestrebte Wachstum ausführt, sondern daß mit der mechanischen Hemmung auch korrelative Wirkungen eintreten, als deren Erfolg sich in der wachsenden Region die Wachstumstätigkeit in einer jeden möglichen Richtung in erhöhtem Maße geltend macht.“ (Pfeffer.) — Beim weiteren vorsichtigen Abgraben des Gefäßinhaltes wurden stets mehr oder weniger große Schollen von muscheligem Bruch erhalten, die an den Bruchflächen häufig solche gequetschte Wurzelpakete aufwiesen. Gegen die tieferliegenden Schichten zu kamen diese „Wurzelhorizonte“ auch mehr in Richtung der Vertikalen vor. In den oberen 5 cm des Bodens aber hatten schräg nach abwärts dringende Wurzeln auch die dünnen horizontalen Querlamellen vertikal gesprengt, so daß diese Schicht beim Abheben in einzelne kleinere Bruchstücke, ähnlich losen Krümeln, zerfiel. Die Pfahlwurzeln der einzelnen Pflanzen waren meist unter Hinterlassung stark verdichteter Wandungen bis in die volle Tiefe gedrungen, trotz der starken Verdichtung, zeigten sich aber schwarz gefärbt und in der Verwesung begriffen, wohl infolge der mangelnden Durchlüftung, denn auch in unbepflanzten Böden dieser Art konnte häufig bei Eröffnung im Innern eine blaugraue Färbung der Erde und ein fauliger Geruch bemerkt werden.

Bei den gleichen Kulturen auf eingestampfter Versuchsfelderde, wo diese starke Verdichtung, wie gesagt, nicht erreicht wer-

den konnte und nur eine engste Zusammenpressung der Krümel statthatte, waren die Verhältnisse wesentlich andere. Die Wurzeln waren hier ohne große Schwierigkeit nach allen Seiten verbreitet; nahe der Oberfläche aber war durch „Keil- und Hebelwirkung" der Wurzeln im Verein mit der selbsttätigen Gefügelockerung bei Wasseraufnahme seitens der gepreßten Bodenteilchen wieder eine lockere Lagerung entstanden.

Es steht somit zweifellos fest, daß es sich bei allen diesen Vorgängen um eine Kombination der Selbstlockerungsfähigkeit der Böden mit sekundären mechanischen Wirkungen der Wurzeln handelt, wobei noch die verschiedenen Einflüsse der letzteren auf das physikalische Verhalten des Bodens zum Wasser eine Beschleunigung und Steigerung hervorrufen mögen.

Durch die Vorgänge der Selbstlockerung, wie sie durch Kohäreszenzverschiebungen bei wechselndem Feuchtigkeitsgehalte im Innern einer Bodenmasse, wie besonders nahe der Oberfläche, zutage treten, vermögen vor allem bindigere Bodenarten ihr Gefüge in verschiedener Weise aufzulockern und schuppenartige plattige Schollen von muscheligem Bruch abzuspalten, sofern der Raum genügend vorhanden ist, während gegen die Tiefe zu eine wirkliche Abspaltung unterbleibt, eine gewisse „Spaltbarkeit" aber immerhin zu finden ist. Sobald die Wurzeln der Pflanzen in einem so von Natur vorbereiteten Boden sich verbreiten, werden die mehr gerade nach unten eindringenden Wurzeln vermöge ihrer Sprengwirkung auch eine Zerteilung in vertikaler Richtung hervorrufen, während die mehr seitwärts gehenden Nebenwurzeln von Pfahlwurzlern die horizontalen Spalten besonders gut und wirksam auszunützen vermögen. Je geschlossener ein Pflanzenbestand ist, desto häufiger und intensiver werden jene horizontal und vertikal gerichteten Wirkungen für die gleiche Fläche zur Geltung kommen, desto ergiebiger wird die Zerteilung in kleinere Bruchstücke sein. Nehmen wir noch die Tatsache hinzu, daß die Wurzeln eine ganz hervorragende Anpassungsfähigkeit an die im Boden gegebenen Strukturverhältnisse besitzen, daß insbesondere die Pfahlwurzler mit Dickenwachstum der Wurzeln bezüglich solcher Sprengwirkungen besonders leistungsfähig sind, und daß diese Pflanzen durch mehr horizontal verlaufende Seitenwurzeln für jene Querlamellierung der sich selbst lockernden Böden wie geschaffen sind, sich zwischen den abgespaltenen Blättern zu verbreiten und sie

bei späterem Dickenwachstum zu heben und dadurch für tiefere Schichten wieder Raum zu schaffen zu neuer Lockerung, so dürfte damit eine Reihe von Vorgängen der sog. Beschattungsgare sowie die Beobachtungen Schumachers, daß er bei stärker gebundenen Böden unter geschlossenem Pflanzenbestande eine vergrößerte „Mürbung“ und besonders bei geschlossen stehendem Raps, Buchweizen, Klee und Erbsen eine „entschiedene Auflockerung“ gefunden habe, dem Verständnis näher gebracht sein.

Hierzu sei noch erwähnt, daß bei den dichten Versuchsfeldböden sich eine Zunahme der Porosität um ca. 3—4% gegenüber der ursprünglichen Lagerung fand, und zwar im gleichen Sinne bei den eingestampften wie eingeschlämmten Böden, nur daß erstere (in der zweijährigen Versuchsreihe) durchweg etwas über 4% Volumzunahme aufweisen. Doch hier sind die diesbezüglichen Unterschiede für bepflanzten und unbepflanzten Boden gering, sie sind aber bei den einjährigen Kulturen mit eingeschlämmtem Boden (Versuchsfeldboden und Lehm) überall vorhanden, nicht aber bei dem weniger dicht gelagerten eingestampften Versuchsfeldboden, wo sich die Unterschiede offenbar innerhalb der Fehlergrenzen halten. Was die in Tabelle II zusammengestellten Ergebnisse der Untersuchungen anlangt, so ist zu der dort auftretenden geringen Größe der Zunahme des Porenvolums durch die Durchwurzelung der eingeschlämmten Böden zu bemerken, daß sich das Bild der Porositätsverhältnisse insofern verwischt, als sich hier die allmählich eingetretene Lockerung nur auf die oberflächlichen Partien (siehe Fig. Seite 35) der Versuchsböden erstreckt, so daß die gefundenen Zahlen infolge ihrer Berechnung aus dem ganzen Bodenvolumen hinter dem wirklichen Lockerheitszustande der betreffenden Schichten zurückstehen.

Jene sichtlichen Lockerungsvorgänge unter Pflanzenbeständen sind nicht allein bei Pfahlwurzlern beobachtet worden, auch unter dem Einfluß feiner Gramineenwurzeln treten solche Erscheinungen oft in ganz auffälliger Weise zutage. Wohl dürfte bei den letzteren freilich neben der Fähigkeit der Auflockerung eines stark verdichteten Bodens in besonderem Maße auch die Verhinderung der Verdichtung eines normal lockeren Bodens über das günstige Maß engster Lagerung der Krümel hinaus wirksam sein.

In der älteren Literatur und bis herein in die neuere Zeit finden sich zahlreiche einander widersprechende Angaben hin-

sichtlich der Praxis der Wiesen- und Weidenbehandlung, wobei die einen (Sendtner, Thaer, Nowacki, Wollny, Stebler, Strecker u. a.) von einer fortschreitenden Verschlechterung infolge Verdichtung der Narbe sprechen, andere dagegen wieder behaupten, „daß es Wiesen gebe, die sich allmählich verbessert und den besseren Ertrag bei angemessener Düngung dauernd beibehalten haben, und daß Dauerwiesen solchen Verhaltens nicht ohne weiteres durch Neuanlage wieder herzustellen seien“[1]). Vor allem aber hat E. Ramann[2]) in neuester Zeit immer wieder auf die Tatsache hingewiesen, daß die krümelnde Einwirkung vor allem der feineren den Boden durchziehenden Wurzeln eine bedeutende sei:

„Untersucht man den Boden unter Gräsern mit starkem Wurzelgewebe, so findet man ihn stets mehr oder weniger deutlich gekrümelt . . .“

„Trockentorf geht unter Aira flexuosa bald in gekrümelten Humus über, und alle Humus zerstörenden Gräser wirken in ähnlicher Weise . . .“

„Die Wiesengräser haben zahlreiche dünne, fadenförmige Wurzeln, die nur zum Teil mit zahlreichen Faserwurzeln besetzt sind, und die oberen und mittleren Schichten des Bodens durchziehen und zur Lockerung des Bodens wesentlich beitragen.“

Eine ähnliche Mitteilung lesen wir auch bei J. B. Lawes[3]):

„Die Veränderungen des Bodens unter einer Grasdecke,“ wo es heißt, „daß das Land bis zu 9 Zoll Tiefe im Jahre 1879 mehr Erde enthielt als im Jahre 1888, woraus geschlossen werden könnte, daß der Boden in den zehn Jahren lockerer geworden ist.“

Ferner haben die mehrfach erwähnten Untersuchungen von C. Kraus derartige Erscheinungen ermittelt:

„. . . schließlich öffnen sich die Wurzeln in verdichteter Erde selbst neue Wege. In der unteren Schicht der Freilandskulturen war übrigens die Erde bis zum Spätherbst des dritten Jahres durchaus nicht dicht gelagert, obwohl der Boden zufolge seines großen Gehaltes an sehr feinem Sand in hohem Maße zur Verdichtung neigte, gleich nach der Anlage 1908 sehr schwere Regengüsse

---

[1]) Kraus, l. c., S. 392 ff.
[2]) Ramann, Bodenkunde, S. 457 ff.
[3]) Wollny, Forschungen, Bd. 13, S. 68 ff.

niedergingen, und die Sommer 1909 und 1910 an starken Niederschlägen sehr reich waren. Bei den Ausgrabungen zur Entnahme der Erdstücke behufs Bestimmung der Wurzeln mußte sehr sorgfältig verfahren werden, um die Erde zusammenhängend zu erhalten.“ —

Verfasser fand die gleichen Lockerheitszustände selbst noch im Sommer 1912 bei der Ausführung seiner Freilandsuntersuchungen auf den gleichen Parzellen, von welchen oben die Rede war. Die zum Zwecke eingehender Beobachtung der dortigen Strukturverhältnisse gezogenen, bis zum Kiesuntergrund geführten (40 cm tiefen) Gräben quer durch die Grasparzellen des Versuchsfeldes erlaubten einen Einblick in die Vorgänge im Wiesenboden, auf Grund dessen die Erscheinungen einer langjährigen Erhaltung eines gewissen Lockerheitszustandes zugleich mit den Verhältnissen der Selbstlockerung aufgeklärt werden konnten, soweit wenigstens die physikalische Seite jener Frage in Betracht kommt. Daß diese Verhältnisse so lange im Dunkeln bleiben konnten, mag wohl auch damit im Zusammenhang stehen, daß die Untersuchung recht umständliche und anstrengende Manipulationen an Ort und Stelle voraussetzt — Verfasser war genötigt, stundenlang in den erwähnten Gräben liegend durch vorsichtiges Abgraben der Grabenwand gegen das Innere mit der Messerspitze die Strukturverhältnisse des „gewachsenen“ Bodens zu studieren —, daß aber außerdem die Erfahrungen über Gefügelockerung, besonders unter dem Einfluß der Pflanzenwurzeln für die Erkenntnis vorbedingend waren.

Vor allem war es die eingehendere Betrachtung dieser sog. „Krümel“, aus denen sich der lockere Boden unter einer Grasdecke zusammensetzt, welche bald eine Vermutung über ihr Zustandekommen erweckte. Zwar ist der Begriff „Krümel“ kein absolut feststehender und einheitlicher, aber doch ist die allgemeinste Auffassung die, daß es sich um Aggregate einzelner Bodenbestandteile handelt, welche wieder eine Anzahl Hohlräume (Poren) in ihrem Innern enthalten. Dieser Definition zufolge dürfen wir jene unter älteren Grasbeständen erhaltenen Aggregate von Bodenteilchen nicht als „Krümel“ bezeichnen, denn die dort auftretenden Bruchstücke zeigen häufig eine vollständig dichte, in Einzelkornstruktur befindliche Lagerung und weisen bei fortschreitender Tiefe der Bodenschicht, wo sie gefunden werden, immer deutlicher

eckige Formen auf, bis wir im Untergrund selbst — solange er unberührt, in seiner natürlichen Lagerung belassen, betrachtet wird — den Eindruck einer geschlossenen, dichten Bodenmasse erhalten. Entnimmt man aber ein größeres Erdstück dem Gesamtverbande, so zerfällt es sofort in ein lockeres Haufwerk solcher kleinerer eckiger, in Einzelkornstruktur befindlicher Bruchstücke. Während aber im bewachsenen Boden durch die zahlreichen Wurzeln im Obergrunde diese Teilchen weiter auseinandergerückt und dauernd auseinandergehalten werden, hat im unbewachsenen Boden auch schon der Obergrund jenes Aussehen einer gleichmäßig dichten Bodenmasse, die allerdings, wie wir gesehen haben, im Zustand starker Kohäreszenzverschiebungen befindlich, nur nicht den Raum besitzt, sich weiter auszudehnen.

Durch äußerst sorgfältige Behandlung des Bodens der erwähnten Graskulturen von der Grabenwand her konnte schließlich entdeckt werden, daß auch die obersten Partien des Bodens unter den Graspflanzen nur ein zersplittertes, aber in seinen Bestandteilen dichtes Gefüge darstellten, zwischen dessen Bruchstücke sich die Wurzeln drängten, so daß sie jene Bodenteilchen wie mit einem Netz umhüllten. Infolgedessen mußte natürlich diese ganze geschlossene Bodenmasse bei einer nur geringen Erschütterung durch den Spaten, wie bei Abheben einer Plagge, durch Verschiebung und Verspannung der Maschen dieses Wurzelnetzes sofort zerrissen und in ein lockeres Haufwerk aufgerüttelt werden. Diese Umstände führen zu dem Schlusse, daß es sich hier tatsächlich nicht mehr um das ursprünglich lockere Gefüge des Bodens handelt, sondern um eine in Teilstücke und Bröckchen infolge Dichtschlämmung und nachfolgender Selbstlockerung und Verstärkung derselben durch die Wurzeln zerspaltene dichte Masse. Daß hierbei die intensivere Wasserbewegung im Bereich der Wurzeln, d. h. einerseits eine Verlangsamung nach abwärts, andererseits eine stärkere Austrocknung der oberen, von Wurzeln durchzogenen Schichten, noch fördernd gewirkt hat (Ramann), darf als begründet erscheinen. Wir haben also hier die nämlichen Vorgänge vor uns wie bei den Erscheinungen der Selbstlockerung und sekundären Wurzelwirkung in dichten Böden. Diese Tatsache trat auch bei den Untersuchungen verschiedener uralter Weideböden in unseren Vorbergen ganz besonders hervor. So wurde beispielsweise auf der Koth-Alm (1134 m) im Jachenauer Gebiet

auf den nur durch gelegentliche Stallmistdüngung aufgefrischten, seit alters gehaltenen Wiesen folgendes festgestellt:

Der Bestand mit Pflanzen ist ein äußerst dichter, aber eine nur wenige Zentimeter umfassende Narbe, mit zahlreichen Ausläufern und derben Wurzeln durchsetzt. Auch hier verläuft eine ganze Anzahl Wurzeln schon oberhalb des Bodens. Die ersten Zentimeter des Bodens nach unten sind erfüllt von einem dichten Wurzelfilz, zwischen dessen Maschen sich lockerliegende „Krümel" befinden. Diese zeigen häufig kantige Formen, und zwar mit zunehmender Häufigkeit nach unten zu. Bei älteren Aufschlüssen wurde infolge der stärkeren Austrocknung stets diese scheinbare Krümelstruktur als eine durch zahlreiche feinere und gröbere Sprünge schollenartig zerteilte, jedoch in Einzelkornstruktur liegende anscheinend homogene Masse erkannt. Wenig (5—6 cm) nach abwärts hat sich auch diese „Krümelstruktur" verloren und ist in einen äußerst festen, speckigen, in Einzelkornstruktur liegenden Boden übergegangen. Die äußerst dichte Wurzelmasse der Oberkrume ist bedeutend zurückgegangen, dafür finden sich kräftigere, wenig verzweigte Wurzeln, meist nicht mehr von Gräsern stammend, die anscheinend unter großem Kraftaufwand in die Tiefe gedrungen sind, wie die stark verdichteten Röhrenwandungen beweisen. Bei sorgfältiger Ausgrabung solcher Untergrundsproben aber fand man stets nicht etwa eine ihrem Aussehen entsprechende gleichmäßig kohärente dichte Bodenmasse, sondern Erdstücke, die bei geringem Drucke Sprünge und Risse zeigten, wie sie vorher im natürlichen Zustande nicht gesehen wurden. Dabei fanden sich nicht selten im Verlaufe der Spaltungsflächen mehrere sich verzweigende Wurzeln, oft ein ganzes Geflecht. Daß aber diese Wurzeln nicht Urheber jener Spalten von Anfang an waren, erhellt schon aus der überwiegenden Mehrzahl solcher horizontal verlaufender Risse ohne Wurzeln oder Wurzelspuren. Im übrigen wurden auch kräftige Pfahlwurzeln gefunden, deren Spitze plötzlich horizontal umgebogen und dem Laufe einer solchen Zone verminderter Kohäreszenz gefolgt war.

Also waren auch auf diesen gewiß seit uralter Zeit unberührten Böden unter der ständigen Einwirkung eines dichten Pflanzenbestandes jene Lockerheitszustände, wie sie auf den Parzellen des Versuchsfeldes und in älteren Topfkulturen zutage traten, zu konstatieren, nur daß die Trennung von lockerem Obergrund und

dichtem Untergrund noch schärfer ausgeprägt schien. Demzufolge wäre anzunehmen, daß allgemein die Wurzeln auf die verschlämmenden Wirkungen des Regens und der Nässe überhaupt, sowie anderer auf Verdichtung des Bodens abzielender Verhältnisse einen ausgleichenden Einfluß ausüben, indem sie einerseits durch mechanische Einwirkungen eine gleichmäßige Zusammenlagerung der in Einzelkornstruktur übergeführten Bodenmasse ständig verhindern, wobei sie sich besonders in bindigen Bodenarten die Vorgänge der Selbstlockerung auch durch entsprechende Anpassung ihres Wurzelsystems zunutze machen, andererseits aber durch verschiedenartige Wirkung auf die Wasserbewegung jene Einflüsse noch verstärken. Der Untergrund aber dürfte besonders dort, wo durch ständige Entnahme der oberirdisch produzierten Teile eine zunehmende Verflachung des Wurzelsystems eintritt, wie die Untersuchungen von C. Kraus gelehrt haben, bei fortdauernder Einwirkung auf Verdichtung hinarbeitender Verhältnisse (Abschlämmung feiner Teile, Zusammenlagerung des Bodens bei Überstauung mit Wasser und breiartige Aufweichung) parallel mit der abnehmenden Wurzelmenge in der Tiefe allmählich in seiner Struktur verschlechtert werden, da eine Zerteilung seitens der Wurzeln unterbleibt, die Erscheinungen von Kohäreszenzverminderung und Selbstlockerung aber sonst ohne Wert bleiben, zumal ja auch der Mangel an Raum eine tatsächliche Lockerung im Sinne einer günstigen Wasser- und Luftbewegung verhindert.

Aus den in obigen Abschnitten dargelegten Untersuchungen ergibt sich kurz zusammengefaßt folgendes:

1. Verschiedene Bodenarten, besonders tonreichere, besitzen die Fähigkeit, nicht nur durch Aufnahme von Wasser ihr Gefüge aufzulockern, sondern auch bei geeignetem Wechsel von Trockenheit und Nässe, Frost und dergleichen durch Kohäreszenzverschiebungen von selbst eine mehr oberflächliche (meist horizontal verlaufende) blättrige Zermürbung eintreten zu lassen.

2. Im bewachsenen, locker gelagerten Boden wird auch bei anscheinend starker Durchwurzelung nur ein sehr kleiner Prozentsatz des Porenraumes beansprucht, so daß dadurch allein keine wesentliche Verminderung des ursprünglichen Lockerheitszustandes eintritt. Dichtere Lagerung unter dem Einflusse der Wurzeln ver-

mag sogar bis zu einem gewissen Grade eine Verbesserung der Bodenstruktur und Vermehrung der Produktion zu bewirken.

3. Im bindigen, verdichteten, in Einzelkornstruktur liegenden Boden werden die Selbstlockerungsvorgänge durch die mechanische Wurzeltätigkeit einerseits, durch eine starke Modifizierung der Wasserverhältnisse andererseits in einer den Pflanzen günstigen Weise verstärkt.

4. Hinsichtlich der Bedeutung sog. Wurzelröhren für die Ausbreitung der Wurzeln im dichten Boden scheinen die Wurzeln selten imstande zu sein, davon wirksamen Gebrauch zu machen.

5. Entsprechend ihrer mechanischen Wirkung verändern die Wurzeln im dichten und lockeren Boden ihr Wachstum regulatorisch.

6. Aus der vorteilhaften Kombination von Selbstlockerung und Wurzeltätigkeit erklärt sich sowohl die vielfach gemachte Beobachtung einer ständigen Verbesserung der Struktur unter dauerndem Einfluß der Wurzeln (Grasland), wie auch die Hintanhaltung einer dauernden Dichtschlämmung des Bodens durch die Niederschläge.

V. Das Eindringen von Wasser in den Boden unter dem Einfluß der Vegetation.

Zu den Versuchen über die Geschwindigkeit des Eindringens von Wasser in den Boden diente eine einfache Vorrichtung, die keinerlei Anspruch auf Gewinnung exakter Werte macht, die aber im Laufe zahlreicher, durch ihre leichte Handhabung ermöglichter Beobachtungen ihre Zweckmäßigkeit bewies und eine Reihe interessanter Resultate ergab.

Ein Hohlzylinder aus Glas wurde ursprünglich mittels geschärfter Ränder auf verschiedenen Parzellen des Versuchsfeldes einige Zentimeter in den Boden eingebohrt und mit Wasser aufgefüllt, wobei die Zeit bis zum Eindringen desselben ganz auffallende Verschiedenheiten erkennen ließ. Die mehrmalige Eröffnung eines auf diese Weise durchnäßten Bodens zeigte, daß das Wasser — wenn der Zylinder nur 2—3 cm im Boden steckte — ohne große seitliche Verbreitung in der Zone eines steilen Kegels nach abwärts drang. Auf Grund dieser Beobachtung wurde ein unten zugeschärfter Messinghohlzylinder mit einem aufschraub-

baren ebenfalls zylindrischen Glasaufsatz — wie ihn Kopecky zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit benutzt — stets in 3 cm Tiefe unter Drehen eingedrückt, was nur ganz wenig Veränderung im Boden ausmachte; an den Rändern des Glaszylinders waren in 4 cm Abstand zwei horizontale Eichstriche angebracht, und es wurde die Zeit des Sinkens des Wasserspiegels von der oberen zur unteren Marke mit einer Stoppuhr gemessen. Die Anbringung zweier nahe aneinander liegender Niveauflächenmarken sollte die Ausschaltung komplizierter Vorrichtungen zur Messung bei konstanter Wassersäule ermöglichen.

Mit Hilfe dieser Vorrichtung wurde im Laufe vieler Versuche eine Größe ermittelt, die als „Leitungsgeschwindigkeit" für Wasser bezeichnet werden soll.

Die in Tabelle IV aufgeführten Zahlen stellen das Mittel aus je 30 Bestimmungen dar. Aus denselben ergibt sich folgendes:

1. Gefäßversuche mit Versuchsfeldboden (Tabelle II).

Die auf eingestampftem Versuchsfeldboden angelegten zweijährigen Kulturen lassen gegenüber locker eingefülltem Boden überall einen größeren Widerstand gegen das Eindringen von Wasser erkennen. Der Einfluß der Wurzeln macht sich darin bemerkbar, daß im lockeren Boden die Leitungsgeschwindigkeit unbedeutend geringer, im dichten Boden dagegen bedeutend größer ist mit als ohne Vegetation.

Die auf eingeschlämmtem Versuchsfeldboden angelegten einjährigen Kulturen (Vegetationsdauer ca. 4 Monate) lassen im Vergleich zu locker eingefülltem Boden ebenfalls einen weit größeren Widerstand für Wasser erkennen. Im lockeren Boden aber ist die Leitungsgeschwindigkeit mit Vegetation größer als ohne Vegetation. Im dichten Boden ist sie überall äußerst gering, so daß innerhalb der beobachteten Zeit (12 Stunden) Unterschiede mit und ohne Vegetation nicht festzustellen waren.

2. Gefäßversuche mit Lehm.

Auf eingestampftem Lehm zeigten die zweijährigen Kulturen überall sehr große Widerstände gegen das Eindringen von Wasser, so daß auch hier innerhalb der Beobachtungszeit keine Unterschiede für bepflanzten und unbepflanzten Boden festgestellt werden konnten. Die Leitungsgeschwindigkeit im lockeren Lehm dagegen ist wesentlich geringer als im Versuchsfeldboden.

Auf eingeschlämmtem Lehm zeigen die 4 Monate alten Kul-

turen eine äußerst niedrige Leitungsgeschwindigkeit. Im lockeren Boden aber zeigt sich auch hier eine Verminderung der Leitungsgeschwindigkeit durch die Vegetation, besonders bei Hafer.

3. Freilandsversuche bei älteren Graskulturen.

Hier erscheint zunächst die Leitungsgeschwindigkeit in den unbebauten Parzellen als eine bedeutend geringere als in jenen, die mit Gras bewachsen sind. Dabei aber ist wieder zu unterscheiden sowohl nach Arten wie nach Nutzungsweise. So ist bei den wie gewöhnlich als Wiese zweimal geschnittenen Abteilungen (mit Ausnahme von vier Arten) die Leitungsgeschwindigkeit größer als da, wo die Gräser viermal geschnitten worden waren.

4. Freilandsversuche mit Getreidekulturen (in Kombination mit verschiedener Bodenbearbeitung).

Die Leitungsgeschwindigkeit ist da größer, wo noch im Frühjahr gegraben worden war; sie ist zugleich größer auf den Parzellen mit Vegetation als jenen ohne Vegetation. Zwischen den einzelnen Getreidearten selbst bestehen keine wesentlichen Unterschiede.

Zur Erläuterung der Befunde ist folgendes zu sagen:

1. Die Größe der Leitungsgeschwindigkeit (d. h. hier die Raschheit des Eindringens von Wasser in den Boden) ist das Ergebnis der kombinierten Wirkung von verschiedenen, teilweise einander entgegenarbeitenden Faktoren: der Veränderungen in der ursprünglichen Lagerungsweise der Bodenteilchen durch Eigengewicht, Selbstlockerungsvorgänge, mechanische Wirkung von Beregnen und Begießen; der Veränderungen hierin durch die Wurzeln, einerseits durch deren mechanische Tätigkeit, andererseits passiv durch Beeinflussung der erst bezeichneten Lagerungsänderungen durch die Gegenwart der Wurzeln; das verschiedene Maß der Ausfüllung der Zwischenräume durch die Wurzeln, mit den durch die Wurzelmengen und Wurzelausbildungsweisen parallel gehenden Verschiedenheiten; die Wachstumsverhältnisse der oberirdischen Teile, womit Veränderungen in der Einwirkung der äußerlichen Kräfte auch im Maße des Eindringens des Wassers verbunden sind. Endlich kommen die Veränderungen der Bodensubstanz an der Grenze der Berührung mit dem Wasser in Betracht.

2. In den Gefäßkulturen überwog bei der zweijährigen Versuchsreihe im lockeren Versuchsfeldboden die Verzögerung der

Wasserbewegung nach abwärts durch die Wurzeln, während im dichten Boden zusammen mit seiner Selbstlockerungsfähigkeit wohl auch durch die lockernde Tätigkeit der Wurzeln die Wasserbewegung erleichtert war. Bei den 4 Monate alten Kulturen machte sich die Verlangsamung des Setzens des Bodens in erster Linie bemerkbar; im lockeren Lehm aber war das Verhältnis das gleiche wie im lockeren Versuchsfeldboden, hier war auch bei den einjährigen Kulturen das Verhältnis unverändert, nämlich das Eindringen des Wassers durch die Gegenwart der Wurzeln erschwert.

3. In den Graskulturen erscheint die Leitungsgeschwindigkeit dort herabgesetzt, wo durch häufige Entnahme der oberirdischen Teile eine Verflachung des Wurzelwerkes und eine stärkere Verbreitung in den obersten Teilen der Krume zugleich mit einer wesentlichen Veränderung in der Stärke und Ausbreitungsweise der einzelnen Fasern eingetreten ist. Nur bei Dactylis, Phleum, Alopecurus und Lolium tritt eine Umkehrung dieser Verhältnisse der beschleunigten Wasserleitung ein. Dies rührt daher, daß bei Dactylis und Phleum wegen ihres Wachstums in geschlossenen Horsten die Bodenbedeckung viel geringer ist als bei anderen Grasarten, weshalb hier bei der weniger dichten Bedeckung der nur zweimal geschnittenen Narbe die Niederschläge eine stärkere Bodenverdichtung hervorrufen konnten. Zu Alopecurus ist zu bemerken, daß die angesäte Varietät einen sehr dichten Wuchs hat mit stärkerer Bodenbedeckung und Durchwurzelung, aber mit geringen Unterschieden gegenüber der Parzelle mit viermaligem Schnitt. Lolium perenne steht beim viermaligen Schnitt viel weniger geschlossen als bei zweimaligem Schnitt.

4. Bei den Getreidesaaten überwiegt deutlich die Verlangsamung im Zusammensetzen des Bodens die geringere Einwirkung der Niederschläge auf den bebauten Boden; es zeigt sich, wie mit der Zeit die Bodenverdichtung vorwärts schreitet bei Wintergetreide gegenüber Sommergetreide — aber immer noch ist der Leitungswiderstand geringer als im unbebauten Boden.

5. Mit diesen Erfahrungen stimmen auch die Resultate von Kossowitsch[1]) überein: Je länger der Boden unbebaut liegt,

[1]) Kossowitsch, Die Schwarzerde (Int. Mitt. f. Bodenkd., Bd. I, Heft 3, 4). Aus einigen Zahlen ist die Tiefe des eingedrungenen Regenwassers in verschiedenen Zeiträumen nach dem erfolgten Niederschlag ersichtlich. Dem-

um so dichter wird er; hierbei ist zu beachten, daß die Pflanzen durch ihr Wurzelgeflecht, das an sich bei gleicher Struktur die Abwärtsbewegung des Wassers verlangsamt, einen wesentlichen Einfluß auf die Lockerheitszustände des Bodens, doch in der Richtung ausüben, daß je nach Art und Bestand, zum Teil im Zusammenhang mit der Länge der Vegetationszeit, die Leitungsgeschwindigkeit für Wasser im Boden oft in erheblichem Maße größer gehalten wird gegenüber unbestandenem Boden.

Obige Versuche lassen den großen Einfluß ersehen, den die Vegetation auf das Eindringen des Wassers ausübt, und insbesondere, daß durch eine starke oberflächliche Verbreitung der Wurzeln, wie sie auf Wiesen- und noch mehr auf Weideböden infolge der häufigen Entnahme der oberirdischen Teile nachgewiesenermaßen[1]) eintritt, in verschiedenem Maße je nach der Grasart eine Verlangsamung der Wasserbewegung nach abwärts bedingt wird. Soweit also das Wasser der Niederschläge nicht von den oberirdischen Teilen der Pflanzen wegdunstet, wobei ja bekanntlich ein Drittel oder mehr der Niederschlagsmenge einer Vegetationsperiode verloren geht, ohne den Boden zu berühren, staut es sich zunächst in den oberen Partien des Bodens, von dem aus es erst allmählich den tiefer liegenden Erdschichten zugeleitet wird. Mit dieser Verlangsamung der Wasserbewegung ist eine Aufweichung der zwischen den Wurzeln befindlichen Erde verbunden, so daß wohl auch ohne die direkte Einwirkung des die Oberfläche treffenden Regens eine Auflösung der ursprünglichen Krümelstruktur stattfindet, die allmählich in Einzelkornstruktur übergeht, auch wenn dabei eine Verdichtung der Bodenmasse im ganzen nicht stattfindet. In Zeiten der Trockenheit äußert sich die starke Durchwurzelung in einer starken Wasserentziehung und Austrocknung der betreffenden Bodenzonen, so daß diese besonders nachhaltigen Schwankungen des Feuchtigkeitsgehaltes unterworfen sind. Diesen Umstand hat auch Ramann[2]) mehrfach erwähnt:

zufolge würde das Regenwasser im „jungfräulichen" Boden am wenigsten tief, in einem „mehrere Jahre unbearbeiteten" Boden etwas tiefer und in einem „Sommergetreideschlag" am tiefsten innerhalb gleicher Zeiträume seit Aufhören des Regens eingedrungen sein. Das raschere Eindringen bzw. tiefere des Wassers in den Sommergetreideschlag gegenüber freidaliegenden Böden ist eine Folge der größeren Lockerheit von der letzten Bearbeitung her.

[1]) Kraus, Fühlings Landw. Zeitung, Heft 10, S. 337.

[2]) Ramann, Bodenkunde, S. 476ff.

„Alle diese Gräser sind mit zahlreichen feinfaserigen Wurzeln versehen, bilden im Boden ein dichtes Fasernetz, das den Boden stark austrocknet, aber auch locker und lose erhält.“

„Der starke Wasserbedarf der Gräser bewirkt während der Hauptvegetationszeit fast alljährlich ziemlich weitgehende Austrocknung des Bodens und starke Spaltenbildung, die oft in erhebliche Tiefe hinabreicht.“

Die Vergleiche der Wasserleitungsfähigkeit des nicht bewachsenen Bodens gegenüber dem mit Gras besetzten lassen ersehen, wie sehr die Bedingungen der Wasserbewegung zugunsten der Vegetation durch diese selbst verändert werden. Im unbewachsenen Boden zeigt sich schon bald nach der Bearbeitung eine bedeutende und zunehmende Verminderung der Wasserleitungsfähigkeit, nicht aber im bewachsenen Boden, in welchem einerseits durch die Schwankungen im Feuchtigkeitsgehalt stärkere Selbstlockerung hervorgerufen wird (wie im 1. Kap. dargelegt), andererseits die Wurzeln durch Druck und Sprengwirkungen zu weiteren Trennungen der Bodenmasse Anlaß geben. Beides (dazu der Schutz durch die oberirdischen Teile) mindert die Verdichtung, lockert die oberflächlichen Schichten des dichtgeschlämmten Bodens, der sonach auch dem Zutritt der Luft offen bleibt. Es zeigt sich eben auch an den Vorgängen der Wasserbewegung, welch großer Unterschied in den Strukturverhältnissen des bewachsenen gegenüber dem nicht bewachsenen Boden besteht, weshalb aus den von der Bearbeitung her eintretenden Verdichtungen des letzteren oder auch, wie bei Getreide, eines nur kurz dauernd bewachsenen Bodens, nicht ohne weiteres geschlossen werden darf, es müßten auch im Grasboden ganz die gleichen Vorgänge stattfinden und zu einer zunehmenden Verschlechterung der Bodenstruktur führen; wenigstens im Bereiche der hauptsächlichen Wurzelverbreitung verhält es sich, wie gezeigt, wesentlich anders. Der Boden ist unter dem Einfluß der Grasdecke locker infolge der beschriebenen Kohäreszenzverminderungen und Wurzeltätigkeit. Wenn zeitweiser Umbruch von Wiesen und Weiden gleichwohl die Produktion bedeutend steigern kann, so beruht dies, abgesehen von der Erneuerung und Regulierung des ganzen Pflanzenbestandes, Zerstörung von Unkräutern usw., darauf, daß dabei auch tiefere Bodenschichten der Vegetation zugänglich werden und die Durchlüftung des ganzen Bodens in hohem Grade ge-

steigert wird. Gewöhnlich wird dieses Verfahren auch mit guter Düngung verbunden sein.

Im engen Zusammenhang mit diesen Verhältnissen der Wasserbewegung stehen auch die Ergebnisse aus den Untersuchungen über die Sickerwassermengen auf verschiedenen bepflanzten und brach liegenden Böden. So sagt A. Bühler[1]):

„. . . Im Durchschnitt aller Bodenarten ist die Sickerwassermenge unter dem Rasen kleiner als unter Fichten und Buchen. — Im ganzen geht hervor, daß durch die Vegetation die Sickerwassermenge bis zu 50 und 60% gegenüber dem kahlen Boden verringert werden kann. — Durch die Vegetation von Grasarten, von Buche und Fichte wird die Sickerwassermenge bedeutend vermindert. Es fließen rund 33% weniger ab als durch die kahlen Beete."

Wenn die Wasserabsickerung, wie bemerkt, auf bebautem Boden geringer ist als auf nicht bebautem, so ist dabei nicht nur der Wasserverbrauch durch die transpirierenden oberirdischen Pflanzenteile und durch die direkte Verdunstung vom Boden beteiligt, sondern auch der Umstand, daß die Wurzelmasse die Verbreitung des Wassers nach der Tiefe zu verlangsamt. Der Vegetation wird dadurch, besonders auffällig bei Grasflächen, ein größerer Anteil für den späteren Eigenverbrauch gesichert, allerdings wird aber auch bei dichtem Pflanzenbestand das Eindringen des Regenwassers in den Erdboden besonders vermindert.

Da wir das Ineinandergreifen verschiedener gleichzeitig und zum Teil gegensätzlich wirkender Faktoren auch in diesen Ergebnissen vor uns sehen, so ist nicht zu verwundern, wenn in den einzelnen Fällen wesentliche Differenzen in den Sickerwassermengen bei anscheinend in der Hauptsache übereinstimmenden Verhältnissen beobachtet werden. Der direkte und indirekte Einfluß der Wurzeln auf die Wasserbewegung ist jedenfalls mit ein Faktor, der nicht außer acht gelassen werden darf, und dessen Berücksichtigung zur Aufklärung von mancherlei Vorkommnissen in der freien Natur auch in dieser Richtung unentbehrlich ist.

---

[1]) A. Bühler, „Untersuchungen über Sickerwassermengen" (Wollny, Forschungen, Bd. 19, S. 58 ff.).

Tabelle I. Lufttrockengewichte der oberirdisch produzierten Teile von Lolium perenne und Trifolium pratense in der zweijährigen Versuchsreihe.

Boden	Pflanze	Lagerung	1. Vegetationsjahr				2. Vegetationsjahr	
			1. Ernte		2. Ernte		1. Ernte	2. Ernte
			a	b	a	b		
Versuchsfelderde	Lolium perenne	dicht	7,2	8,612	10,64	8,67	10,3	14,05
		locker	5,8	7,685	8,037	5,875	10,0	13,27
	Trifolium pratense	dicht	4,97	14,27	11,375	8,65	12,35	41,05
		locker	3,76	11,98	10,12	7,44	9,31	32,52
Lehm	Lolium perenne	dicht	3,7	—	2,335	—	4,93	—
		locker	4,23	—	2,45	—	5,42	—
	Trifolium pratense	dicht	2,955	—	7,237	—	7,21	32,3
		locker	3,145	—	8,635	—	9,3	34,61

Tabelle II. Zusammenstellung der Ergebnisse aus sämtlichen Versuchskulturen.

Pflanzenbestand	Struktur	Versuchsfeldboden					Lehmboden					Bemerkungen
		Wassergeh.-Vol. %	Leitungsgeschwindigk.	Wurzelvol. in % d. Bodens	Wurzelvol. in % d. Poren	Porosität %	Wassergeh.-Vol. %	Leitungsgeschwindigk.	Wurzelvol. in % d. Bodens	Wurzelvol. in % d. Poren	Porosität %	
ohne	locker	16	18 Sek.	—	—	51,17	16	52 Sek.	—	—	52,2	2jährige Kulturen (der dichte Boden ist eingestampft). (Bestimmt Ende Juli des zweiten Jahres.)
	dicht	15,5	1620 Sek.	—	—	41,29	12	> 12 Std.	—	—	—	
Lolium perenne	locker	17	19 Sek.	—	1,2	52,15	12	110 Sek.	—	1	45,19	
	dicht	12	500 Sek.	—	—	41,25	11,8	> 12 Std.	—	0,5	—	
Trifolium pratense	locker	11,6	24 Sek.	—	2,2	52,34	12	56 Sek.	—	1	49,73	
	dicht	12	780 Sek.	—	—	41,72	10	> 12 Std.	—	0,5	—	
ohne	locker	12,75	38 Sek.	—	—	54,37	15,5	11 Sek.	—	—	60,68	1jährige (d. h. 4 Monate alte) Kulturen (der dichte Boden ist eingeschlämmt).
	dicht	19,7	> 12 Std.	—	—	34,02	16,1	> 12 Std.	—	—	30,53	
Avena sat.	locker	8,4	34 Sek.	0,35	0,63	55,58	8,4	90 Sek.	0,48	0,79	61,51	
	dicht	8,6	> 12 Std.	0,29	0,84	34,34	10,8	> 12 Std.	0,29	0,98	32,8	
Vicia faba	locker	8,9	12 Sek.	0,65	1,18	55,74	11,93	29 Sek.	0,85	1,46	58,41	
	dicht	8,65	> 12 Std.	0,83	2,32	35,55	10,85	> 12 Std.	0,79	2,56	33,9	

Tabelle III. Porositäts- und Bewurzelungsverhältnisse unter Freilandsgrasbeständen.

Bestand	Krume bis 15 cm Tiefe					Krume bis 30 cm Tiefe				
	Steine		Wurzelvol. in %		Porosität in % d. rein. Bodens*)	Steine		Wurzelvol. in %		Porosität in % d. rein. Bodens*)
	Vol. %	Gew. %	des Bodens	der Poren		Vol. %	Gew. %	des Bodens	der Poren	
Phleum	4,3	8,94	3,43	6,01	57,07	14,42	19,68	1,41	3,92	35,94
Dactylis	5,2	7,73	5,25	14,00	37,5	17,41	23,04	0,64	1,92	33,32
Alopecurus	4,83	7,76	4,3	10,0	42,97	12,82	17,97	1,73	4,62	37,38
Festuca prat.	4,65	7,69	3,88	8,7	44,57	—	—	—	—	—
Lolium	3,23	5,99	1,67	3,3	50,55	11,92	15,04	0,63	2,04	30,86
Festuca ovina	8,28	12,56	3,5	8,6	40,7	8,75	12,51	1,51	4,24	35,55
Agrostis	6,21	10,29	2,42	5,34	45,31	—	—	—	—	—
Mischungen {	9,0	14,92	1,37	2,92	46,91	—	—	—	—	—
Mischungen {	6,83	11,87	1,79	3,69	48,48	—	—	—	—	—
Almwiese	0	0	3,5	8,44	41,44	—	—	—	—	vollst. dicht
Ohne Pflanzen	9,32	12,6	0	0	36,37	8,77	12,5	0	0	39,22

*) d. h. nach Abzug des Volums von Steinen und Wurzeln.

Tabelle IV.

Die Leitungsgeschwindigkeit unter verschiedenen Freilands-Gras- und Getreidebeständen.

Bestand	zweimal geschnitten	Häufig geschnitten	Bemerkungen
Phleum prat.	81,2 Sek.	67,6 Sek.	Anderweitige Veränderungen, die sich aus dem Wuchse ergeben, eingreif. (s. Text.)
Dactylis glom.	76,2 Sek.	53,8 Sek.	
Alopec. prat.	137,4 Sek.	105,0 Sek.	
Lolium perenne	58,9 Sek.	49,7 Sek.	
Festuc. prat.	50,9 Sek.	77,3 Sek.	
Festuc. ovina	36,6 Sek.	51,7 Sek.	
Agrostis stol.	39,4 Sek.	67,6 Sek.	
Mischung: Obergräser	54,7 Sek.	79,1 Sek.	
Mischung: Untergräser	35,0 Sek.	89,3 Sek.	
Mischung: Ober- und Untergräser	35,6 Sek.	63,4 Sek.	
Ohne Pflanzen	Min. 198 Sek. Max. > 2 Std.	— —	Freier, nur oberfl. geschürfter Streifen zwischen d. Parzellen.

Bestand	Leitungsgeschwindigkeit in Sekunden		Bemerkungen
Roggen	Wintergetreide	16,86	Bestimmungen Juli 1912 am selben Tage. Wintergetreide, Boden nur im Herbst gegraben. Sommergetreide, Boden Herbst und Frühjahr gegraben.
	Sommergetreide	12,22	
Weizen	Wintergetreide	33,0	
	Sommergetreide	16,7	
Hafer	Sommergetreide	14,36	
Gerste	Sommergetreide	15,05	
Gerste	Beet im Herbst gegr.	69,6	Bestimmungen Ostern 1912 am selben Tage.
	Beet auch Frühjahr gegr.	51,00	
Ohne Pflanzung	Beet im Herbst gegr.	280,8	
	Beet auch Frühjahr gegr.	52,5	